A CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E A ARQUITETURA

YOPANAN C. P. REBELLO

A CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E A ARQUITETURA

Capa
CLÁUDIO MOSCHELLA

Ilustrações
PAULO LACRETA

Revisão
SÉRGIO A. M. DIAS

Projeto Editorial
ZIGURATE EDITORA

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Rebello, Yopanan Conrado Pereira
A Concepção Estrutural e a Arquitetura / Yopanan Conrado Pereira Rebello. -- São Paulo : Zigurate Editora, 2000.

Bibliografia.
ISBN 85-85570-03-2

1. Arquitetura 2. Engenharia de Estruturas
3. Engenharia de Estruturas - Estudo e Ensino
4. Estruturas - Análise (Engenharia) I. Título.

00-2833 CDD-721

Índices para catálogo sistemático:

1. Arquitetura : Estruturas : Construção arquitetônica 721
2. Estruturas : Arquitetura 721

A CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E A ARQUITETURA

YOPANAN CONRADO PEREIRA REBELLO

A CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E A ARQUITETURA

Zigurate Editora
São Paulo, 2000

À Daisy, minha amada esposa e companheira sempre presente.
Ao Eduardo, Francisco e Daniel, meus amados e pacientes filhos.
Aos meus pais José (in-memorian) e Maria.
Às tias Yaponira e Yedda.

AGRADECIMENTOS

Ao amigo arquiteto Paulo Lacreta, com quem tive a honra de dividir a sala de aula; autor das ilustrações contidas neste livro. Ilustrações que exgiam alguém que além de ter bom traço entendesse de estrutura.
À amiga arquiteta Maria Amélia, a Mel, que na época em que ainda era minha aluna provocou o meu interesse para as questões do ensino de estrutura e arquitetura e depois, como colega em sala de aula, incentivou meu trabalho sobre o assunto.
Aos amigos e sempre orientadores Edith Gonçalves de Oliveira e Aluízio Fontana Margarido.
Ao meu filho Eduardo, que muitas vezes me acudiu quando a informática, nas horas cruciais, desafiava minha pouca paciência.
À Editora Zigurate, que na pessoa do arquiteto Luís Andrade acreditou na possilbilidade deste livro.
Aos amigos que são verdadeiramente amigos.
A Deus, que me permitiu tudo isso.

PREFÁCIO

Na natureza, todos os corpos estão sob a ação do meio ambiente. Essa ação é representada pela gravidade, agindo sobre a massa do corpo. A temperatura faz com que o corpo aumente ou diminua de tamanho. O empuxo hidrostático exerce forças quando o corpo está parte ou totalmente submerso. Os sismos, o vento, são adicionados aos fenômenos da gravidade. Alguns desses fatores são perceptíveis facilmente, outros não.

Temos corpos em repouso, em estado de equilíbrio, e outros encontram-se animados por movimentos acelerados, muitas vezes complexos.

A parte mecânica que trata do equilíbrio dos corpos é a estática e a que trata do movimento e da forças é a dinâmica. A maior dificuldade no estudo teórico da mecânica está na dinâmica. Por outro lado, o homem convive qualitativamente com alguns fenômenos dinâmicos com grande intimidade sem se aperceber dos mesmos. O homem é capaz de lançar uma pedra num determinado ponto com grande precisão, avaliando o peso da pedra,o ângulo do lançamento e a quantidade de tempo que ele deve aplicar à força para dar o impulso necessário à pedra.

Nas estruturas, em que se lida com fenômenos como o equilíbrio dos corpos,a compatibilidade de deslocamentos e a elasticidade do material, que são fenômenos simples em seus princípios, o aluno encontra grande dificuldade para ver o fenômeno físico pelo lado qualitativo, que é normalmente a primeira percepção do problema.

Por que essa dificuldade?

A razão é simples: as grandezas físicas colocadas em jogo são pequenas para a nossa percepção orgânica. Assim, nós não temos a experiência, que tão bem nos orienta ao jogarmos uma pedra e nos falta totalmente quando queremos imaginar uma estrutura deformada ou rapidamente intuir as dimensões que uma viga deve ter para resistir às cargas que o homem também nunca conseguiu avaliar com suas próprias forças.

Antes do cálculo estrutural moderno, que possui pouco mais de um século, as construções muitas vezes tinham que ser refeitas várias vezes, procurando-se modificações que garantissem a sua exeqüibilidade estrutural.

Os grandes mestres construtores do passado adquiriam a experiência física qualitativa dos fenômenos das estruturas através dos seus avós, dos seus pais e de outros mestres, que não eram muitos. Esses mestres construtores eram excepcionais.

Hoje, o moderno cálculo estrutural não necessita que se recorra à experiência do fazer, cair e refazer, para termos obras portentosas como as de um Santiago Calatrava, Oscar Niemeyer, Renzo Piano, Giancarlo Gasperini, Paulo Mendes da Rocha, Norman Foster, entre muitos outros também de excepcional valor.

O atual aluno deve ser capacitado quanto à forma, à função e à tecnologia da construção, entendendo ventilação, iluminação, comportamento estrutural, entre outros, para ser um arquiteto.

No estudo das estruturas, temos duas vertentes que devem ser seguidas, para que o aluno adquira a sua experiência: a da percepção e a do conhecimento teórico do cálculo.

O professor deve desenvolver os conhecimentos teóricos ao mesmo tempo em que desenvolve a intuição do aluno.

A maioria dos autores cuida mais dos aspectos técnicos, deixando o conhecimento qualitativo para segundo plano.

O autor Yopanan Conrado Pereira Rebello trata os aspectos qualitativos das estruturas com maestria, o que transforma o tema numa leitura muito agradável.

O título "A CONCEPÇÃO ESTRUTURAL E A ARQUITETURA" enseja uma viagem profícua no campo das estruturas, no qual as qualidades didáticas do autor são notórias.

Em sete capítulos, descreve os fenômenos físicos, os sistemas estruturais básicos ligados aos materiais, a associação dos sistemas estruturais, os sistemas de suporte de vedações, os critérios práticos de lançamento de vigas e pilares; os dois últimos capítulos abordam aspectos da natureza e as suas analogias com as edificações,terminando com um pouco de história das estruturas, que ensejam uma formação culta e agradável do tema.

As ilustrações dos desenhos complementam de maneira primorosa a apresentação do trabalho.

O livro de Yopanan Rebello traz uma importante contribuição ao ensino das estruturas, não só para os alunos como também para profissionais que permeiam a área das estruturas.

São Paulo, agosto de 2000

Aluízio Fontana Margarido

Professor Assistente Doutor da Universidade de São Paulo – Escola Politécnica – Aposesntado
Professor Titular de Pontes e Sistemas Estruturais da Universidade São Judas Tadeu.
Professor Titular de Sistemas Estruturais da FMU – FIAM - FAAM

SUMÁRIO

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO

Há, nas prateleiras das bibliotecas das Escolas de Arquitetura, uma quantidade significativa de publicações dirigidas ao ensino de estrutura para estudantes de arquitetura.
Encontram-se títulos tais como "Estruturas para Arquitetos" ou "Estruturas Arquitetônicas" ou ainda "The Structural Basis of Architecture".
Esses títulos, apesar de denotar uma preocupação com o ensino de estrutura dirigido aos arquitetos ou estudantes de arquitetura, incorrem num desvio em relação aos princípios relacionados ao processo de ensino-aprendizagem de estrutura, pois pressupõem existir um ensino de estrutura voltado para arquitetos e outro voltado para engenheiros, o que constitui uma heresia, pois é impossível um estudo de estrutura que interesse apenas a esse ou àquele profissional.
O que pode existir, e isso é muito claro, é a separação entre o ensino da concepção estrutural e o ensino do cálculo matemático das estruturas.
Um exame atento do conteúdo dessa bibliografia mostra as mais diversas maneiras de abordagem do ensino de estrutura.
Alguns livros falam apenas do comportamento dos diversos sistemas estruturais, sem qualquer referência matemática.
Outros abordam de maneira mais ampla os aspectos matemáticos do cálculo de estrutura, advertindo ser esses cálculos, de qualquer forma, apenas aproximativos, e que, para o dimensionamento definitivo das estruturas, seriam exigidos cálculos mais complexos.

Outros, sem qualquer referência matemática e com poucas palavras, procuram através de ilustrações e fotos de modelos, não ensaiáveis, mostrar o comportamento de uma gama muito ampla de sistemas estruturais.
A grande maioria mostra exemplos de obras edificadas, nos quais se apresenta o sistema estrutural analisado, sem aproveitar a oportunidade para discutir a inter-relação entre a proposta estrutural e a arquitetônica.
À primeira vista, esses livros parecem completos e eficazes no ensino de estrutura.
Um exame mais atento, no entanto, revela que lhes faltam algumas propriedades didáticas importantes, o que pode inviabilizá-los como fonte de aprendizado ou de reforço.
A seqüência dos assuntos nem sempre é a mais lógica, ou seja, partindo dos assuntos mais simples para os mais complexos.
Alguns conceitos são citados antes de ter sido apresentados formalmente, impossibilitando a compreeensão do que está sendo discutido.
Outros são indevidamente aprofundados, tornando-se desinteressantes.
Dificilmente um novo conceito apresentado é relacionado a modelos físicos qualitativos.
Raramente é feita a ponte entre os materiais, sua aplicação em sistemas estruturais e as conseqüências na forma-função da edificação.
Muitos assuntos são abordados, mas sempre de maneira estanque, infelizmente reproduzindo os mesmos erros do ensino formal das escolas.
Pretende-se que este livro , além de estar voltado para o ensino dos assuntos fundamentais para a compreensão do comportamento das estruturas, não perca de vista suas relações com a concepção arquitetônica.
Que, com um conteúdo bastante aberto, interesse não só a estudantes de arquitetura como também aos de engenharia, coerente com a proposição de que não existe uma estrutura para arquiteto e outra para engenheiro.
Deve servir também de material de consulta para profissionais da área que estejam afastados, no seu dia a dia, do convívio com os fenômenos que envolvem o comportamento das estruturas.
Os assuntos são abordados sem a preocupação de aprofundamento desnecessário, mas visando, sempre, a fecundação de idéias básicas que permitam o desenvolvimento do aprendizado com independência.
Há também empenho em incentivar a observação do nosso entorno, relacionando o aprendido com a realidade, utilizando mecanismos como a observação das soluções estruturais na natureza e nas edificações executadas pelo ser humano.
A matéria é desenvolvida na seguinte seqüência:

Capítulo 1
"Conceituação dos Fenômenos Físicos que Ocorrem nos Sistemas Estruturais"

São apresentados os conceitos gerais que, aparentemente óbvios, são fundamentais para infundir no leitor a idéia de estrutura como algo presente no dia a dia e muito próximo dos seres humanos, visando com isso desmistificar a aparente dificuldade de aprendizado do assunto.

Procura-se mostrar que a concepção estrutural não é algo aleatório ou apenas produto da vontade de cada um, mas que depende, sim, de fatores externos como estética, custos, possibilidades construtivas, materiais e tantas outras variáveis; que saber coordenar essas variáveis, achando uma maneira adequada de harmonizá-las, é o que conduz a soluções estruturais criativas e bem embasadas; que a solução original não provém de uma iluminação mágica, mas do profundo conhecimento do existente e de muitas tentativas.

São apresentados os esforços que solicitam os elementos estruturais, mostrando os resultados que esses esforços produzem na forma desses elementos e o seu conseqüente rebatimento nas formas arquitetônicas.

A relação entre esforços e forma das seções dos elementos estruturais é enfatizada pela apresentação de um conceito simples, mas inteiramente inédito: o princípio da distribuição de massas nas seções, que esclarece a razão da existência das seções estruturais de concreto, aço e madeira.

Apresenta-se de uma maneira nova em relação à literatura existente o conceito físico de momento de inércia.

Introduz-se o conceito inédito de hierarquia dos esforços, em que os esforços são classificados dos mais favoráveis aos menos favoráveis, evidenciando que a correta manipulação do conjunto estrutural pode conduzir a esforços tais que resultem formas mais leves ou mais pesadas, de maneira que possam satisfazer ao escopo arquitetônico.

Mais do que mostrar como se comportam determinados sistemas estruturais, busca-se evidenciar a possibilidade de determinadas soluções.

Freqüentemente, chama-se a atenção para as inter-relações entre estrutura, forma e material.

Capítulo 2
"Análise dos Sistemas Estruturais Básicos sob os Aspectos dos Comportamentos Físico e dos Materiais"

Após apresentar uma introdução básica, o livro aborda os sistemas estruturais.
Em vez de fazê-lo de forma aleatória, apresenta-os numa seqüência coerente com o conceito anteriormente apresentado de hierarquia dos esforços, mostrando inicialmente os sistemas estruturais que apresentam os esforços mais favoráveis, passando daí para os menos favoráveis.
Nessa parte do trabalho, introduz-se o conceito, também inédito, de sistemas estruturais básicos, ou seja, seis sistemas estruturais considerados básicos, a partir dos quais, com adequadas associações, podem ser criadas todas as possibilidades estruturais, de maneira análoga às sete notas musicais.
São mostrados os esforços que ocorrem nos seis sistemas básicos e os gráficos que permitem pré dimensioná-los.
Objetivando uma sistematização do processo de concepção estrutural, o livro apresenta, no final deste capítulo, tabelas que correlacionam as variáveis que contribuem para a concepção estrutural, mostrando numericamente, por notas de 1 a 5, as relações que se apresentam melhores que outras, não deixando de lado questões tão atuais como a energética e a ecológica.

Capítulo 3
"Associação de Sistemas Estruturais Básicos"

São apresentadas as possibilidades de associação dos sistemas estruturais básicos, que podem resultar em uma gama imensa de possibilidades de criações estruturais.
Aqui, as estruturas laminares são apresentadas como associação de sistemas básicos mais simples, procurando tornar o entendimento do seu comportamento mais facilmente inteligível.

Capítulo 4
"Sistemas Estruturais para Suporte de Vedações"

Este assunto, normalmente desprezado na literatura existente, merece um capítulo especial.
Nele, é abordada a estruturação de vedações de grande porte, principalmente com vidro.

Capitulo 5
"Alguns Critérios Práticos de Lançamento de Vigas e Pilares"

São apresentados alguns critérios práticos para posicionamento de vigas e pilares nos projetos mais convencionais.

Capitulo 6
"Analogias Entre Sistemas Estruturais da Natureza e os das Edificações"

Procurando fixar conceitos e incentivar a observação, são apresentadas várias analogias entre estruturas criadas pela natureza e as executadas pelos homens, mostrando que são regidas pelas mesmas leis físicas.

Capitulo 7
"Um Pouco da História do Conhecimento Estrutural, sua Divulgação e Aprendizado"

Neste relato histórico, procura-se evidenciar não só como o aprendizado dos fenômenos estruturais evoluiu ao longo do tempo mas também como ocorreu a inter-relação entre o conhecimento estrutural e o arquitetônico, seus encontros e desencontros, sempre resultando na produção de conhecimento.

Yopanan Conrado Pereira Rebello

CAPÍTULO 1

Conceituação dos Fenômenos Físicos que Ocorrem nos Sistemas Estruturais

O que é estrutura?

À primeira vista a resposta a esta pergunta parece óbvia: estrutura é tudo aquilo que sustenta, tal qual o esqueleto humano.
No entanto, o conceito de estrutura é mais amplo e encontra-se em todas as áreas do conhecimento humano.
Se se perguntar a um músico o que ele entende por estrutura a resposta poderá ter palavras diferentes daquelas ditas por um engenheiro ou um arquiteto, mas a idéia básica será a mesma, ou seja, estrutura é um conjunto, um sistema, composto de elementos que se inter-relacionam para desempenhar uma função, permanente ou não.
O que é uma estrutura musical senão uma reunião de elementos - as notas musicais - que se inter-relacionam para desempenhar uma função: emitir um conjunto de sons correspondente a uma linha melódica e ou harmônica que seja apreciado por quem escuta.
Em outras áreas, essa idéia de estrutura mantém-se, como, por exemplo, a estrutura poética, que é constituída de um conjunto de elementos - as palavras - que se inter-relacionam formando os versos, desempenhando a função de transmitir uma idéia ou sentimento de forma literária; a estrutura urbana é um conjunto de edificações, vias e praças que se inter-relacionam, ruas chegando em ruas ou em praças, para que as pessoas possam circular e realizar atividades físicas e intelectuais.
No caso das edificações, a estrutura é também um conjunto de elementos -lajes, vigas e pilares - que se inter-relacionam - laje apoiando em viga, viga apoiando em pilar - para desempenhar uma função: criar um espaço em que pessoas exercerão diversas atividades.
Estrutura, portanto, é conceito que não se associa apenas a edificações. Está em tudo que nos rodeia, nas plantas, no ar e nas pessoas, nos objetos e nas idéias.

A noção de estrutura é parte integrante do inconsciente coletivo. Todo ser humano nasce com a intuição de estrutura e ao longo das suas experiências vividas pode aperfeiçoar esse conhecimento.
Nas atitudes mais corriqueiras das pessoas pode-se verificar essa afirmação: na maneira como manuseiam os objetos, como pegam uma folha de papel, como colocam um objeto sobre a mesa, procurando mantê-lo estável.
O ser humano, desde a mais tenra idade, sem qualquer conhecimento sistemático de estrutura, coloca de pé o seu próprio corpo, uma das estruturas mais complexas.
Todo ser humano dito normal tem no subconsciente a noção de equilíbrio. Assim, é natural que os fenômenos físicos que envolvem a estabilidade de uma estrutura sejam facilmente assimilados.
A dificuldade está no entendimento da tradução matemática desses fenômenos, quando essa tradução é colocada antes de sua conceituação física. Uma forma muito interessante, agradável e de fácil acesso, para se aprimorar no entendimento do comportamento das estruturas é a observação da natureza.
A natureza tende a resolver seus problemas de ordem biológica e física da maneira mais simples, econômica e bela.
Um galho de árvore pode mostrar, de maneira muito visível, os princípios físicos que regem o comportamento de uma viga em balanço (viga fixada em apenas um apoio).
Uma folha de palmeira pode ensinar como obter resistência usando dobraduras em folhas finas.
São inúmeros os exemplos naturais que ajudam a entender melhor o comportamento de um sistema estrutural.
Mais à frente, usaremos alguns exemplos de estruturas naturais para fixação dos conceitos emitidos neste capítulo.

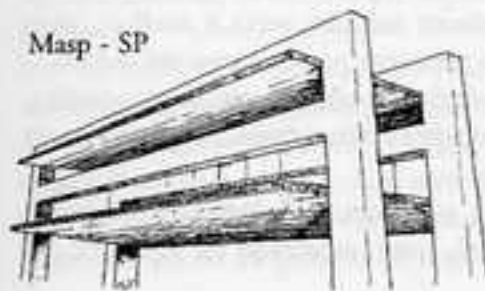
Estrutura como caminho das forças

Viu-se que estrutura é um conjunto de elementos. No caso da estrutura das edificações, esse conjunto de elementos torna-se o caminho pelo qual as forças que atuam sobre ela devem transitar até chegar ao seu destino final, o solo.
O caminho natural que as forças gravitacionais, ou seja, os pesos dos objetos e das pessoas, tendem a tomar é o da vertical.
Se for oferecido a estas forças um caminho mais longo, elas obrigatoriamente terão que percorrê-lo, desviando-se, assim, de sua tendência natural e provocando esforços que solicitarão os elementos presentes nesse caminho.

É como percorrer um labirinto cheio de desvios: a tendência seria seguir em linha reta e, com isso, não se submeter a maiores esforços; a cada curva realizada, se é forçado a mudar de direção, solicitando um esforço adicional ao corpo.
Ao final da corrida, a fadiga será maior do que se fosse percorrido um caminho reto.
O mesmo ocorre com as forças quando obrigadas a desviar-se do seu caminho natural, a vertical.
Para transferir um conjunto de forças até o solo podemos usar poucos ou muitos caminhos.
Uma estrutura com muitos caminhos tende a tê-los mais estreitos; já as com poucos caminhos sofrem um maior acúmulo de forças em cada um, obrigando-os a serem mais largos.
A analogia com uma estrutura viária deixa bem clara essa noção de distribuição de caminhos.
Se a ligação entre dois bairros for feita por apenas uma rua, deve-se construir uma rua bem larga, para que não haja engarrafamento.
Se, ao contrário, houver várias ruas ligando os dois bairros, não haverá necessidade de ruas muito largas.

Anhembi - SP

Estruturas como a treliça espacial de cobertura do Parque Anhembi, em São Paulo, é um exemplo de estrutura com muitos caminhos.
As barras que constituem a treliça são bastante esbeltas, produzindo uma leveza tanto física como visual.

Masp - SP

Já o mesmo não ocorre com a estrutura do MASP, também em São Paulo, na qual apenas quatro vigas e pilares transmitem a maior parte da carga ao solo. É fácil perceber, neste edifício, o peso físico e visual dessas vigas e pilares.

Qual a melhor solução estrutural?

Qual a melhor solução: uma estrutura com poucos ou muitos caminhos ? Para responder a essa questão é interessante socorrer-se de uma outra analogia. Suponha-se que, em uma praça qualquer, se queira apoiar uma estátua sobre uma estrutura adequada.

Uma primeira proposta poderia ser a criação de um único pedestal sob a estátua. Essa solução resolve o problema de maneira bastante simples e direta.

Fig.A

Mas, supondo-se que, além de apoiar a estátua, a estrutura devesse permitir a passagem de pessoas sob ela, a solução do pedestal único torna-se inviável, exigindo uma solução como a proposta ao lado.

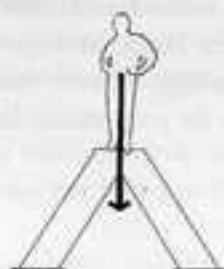



Fig.B

Se o espaço sob a estátua devesse ser o mais amplo possível, a solução mais adequada seria a apresentada na figura ao lado.

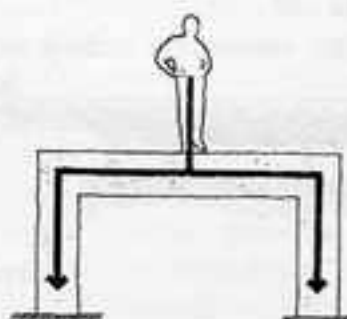



Fig.C

Ao analisar as 3 propostas sob o ponto de vista puramente estrutural, ou de menores esforços, é óbvio que a primeira solução seria a melhor, pois corresponde ao caminho de mais curto percurso para a carga até o solo.
Se outros requisitos forem colocados, poderia não ser este o melhor caminho.
No exemplo, a necessidade de um espaço sob a estátua exige que se procurem alternativas.
A primeira tentativa seria propor uma estrutura que desviasse a força o mínimo possível de seu caminho natural, como mostrado na figura B.

No entanto, a exigência de espaço amplo fez com que a melhor estrutura se tornasse a que mais desvia a força do seu caminho natural: a estrutura apresentada na figura C.
Para reforçar o conceito de melhor solução estrutural, pode-se usar outra analogia: duas localidades A e B devem ser ligadas por uma estrada.
A proposta mais simples e imediata para essa estrada seria a linha reta, já que se pressupõe não haver nenhum impedimento topográfico.
A linha reta levaria de maneira rápida as pessoas de uma localidade à outra, e é a solução mais econômica.
Mas, se a finalidade do caminho não fosse a de levar as pessoas da maneira mais rápida, e sim de fazê-las apreciar paisagens bucólicas e turisticamente interessantes, que estivessem fora do caminho reto? Neste caso, a linha reta deixa de ser a melhor solução.
Os exemplos anteriores mostram que a melhor solução é aquela que procura resolver da melhor maneira os requisitos impostos.
Então, qual a melhor solução estrutural ?
Para responder à pergunta é necessária a formulação de uma outra: melhor em relação a quê ?
A mais fácil de construir ? A mais bonita ? A mais econômica ?
A melhor estrutura na verdade não existe.
Existe, sim, uma boa solução que resolve bem alguns pré-requisitos.
Assim mesmo, não resolve todos os requisitos com o mesmo grau de eficiência.
Uma solução poderá ser econômica no consumo de materiais, mas poderá ser feia e de execução demorada.
Outra poderá ser bonita, mas cara e difícil de ser executada, e assim por diante. Para orientar a escolha é necessário estabelecer uma hierarquia de quesitos aos quais a solução deverá atender, de maneira que se estabeleçam categorias de importância, de forma que a solução encontrada atenda muito bem os mais importantes e bem os menos importantes.
Pode acontecer que se exija que a solução estrutural seja, em primeiro lugar, econômica, em segundo, bonita, em terceiro, fácil de construir, e assim por diante. É função de quem concebe a estrutura fazer com que, apesar de hierarquizados, os requisitos sejam atendidos da forma mais eficiente possível.
Por exemplo, conceber uma estrutura muito econômica, bem bonita e fácil de executar; ou se a hierarquia for outra , uma estrutura muito bonita, bem fácil de executar e econômica. Nem sempre se pode afirmar categoricamente qual é a melhor solução, mas, sem dúvida, pode-se afirmar qual é a pior: a que apresentar o maior desencontro entre os objetivos do projeto de arquitetura e os do projeto de estrutura.

Outra questão que preocupa quem concebe um novo projeto é o de ser o mais criativo e original possível.
"Nenhuma solução é tão original que não tenha um precedente parecido" (Torroja). "Original é o que volta às origens" (Gaudí).
Uma obra, para ser criativa, não precisa ser necessariamente inédita.
A criação do novo passa, também, pela releitura do existente, vendo-o com novos olhos. Para isso, o conhecimento profundo de soluções utilizadas em projetos semelhantes àquele que se vai propor é de capital importância.

Quem concebe a estrutura ?

É quase um dogma a idéia de que quem concebe a estrutura é o profissional engenheiro, que estudou profundamente fórmulas complexas, capazes de resolver os mais difíceis sistemas estruturais.
Isto é um grande engano.
Uma coisa é conceber a estrutura, outra é dimensioná-la para que seja capaz de suportar as condições de trabalho às quais estará submetida.
Conceber é compreender, entender e ser capaz de explicar.
Conceber algo não significa necessariamente materializá-lo.
A concepção da estrutura é anterior ao seu dimensionamento, ou seja à sua quantificação. É uma atitude ao mesmo tempo metódica e intuitiva.
Conceber uma estrutura é ter consciência da possibilidade da sua existência; é perceber a sua relação com o espaço gerado; é perceber o sistema ou sistemas capazes de transmitir as cargas ao solo, da forma mais natural; é idendificar os materiais que, de maneira mais adequada, se adaptam a esses sistemas.
Não se pode imaginar uma forma que não necessite de uma estrutura, ou uma estrutura que não tenha uma forma.
Toda forma tem uma estrutura e toda estrutura tem uma forma.
Dessa maneira, não se pode conceber uma forma sem se conceber automaticamente uma estrutura e vice-versa.
É muito comum ver-se a arquitetura como a criadora de formas que aparentemente possam existir independentes de sua estrutura, dos materiais de que são feitas e do processo de sua construção.
Na verdade, a concepção de uma forma implica na concepção de uma estrutura e, em conseqüência, dos materiais e processos para materializá-la. A estrutura e a forma são um só objeto, e, assim sendo, conceber uma implica em conceber outra e vice-versa.
A forma e a estrutura nascem juntas.
Logo, quem cria a forma cria a estrutura.

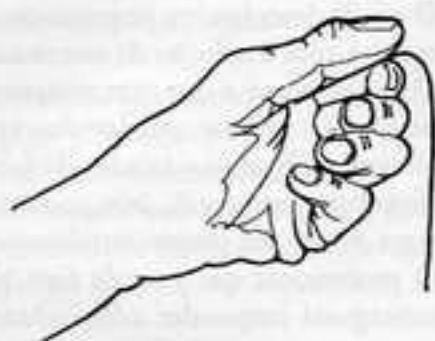
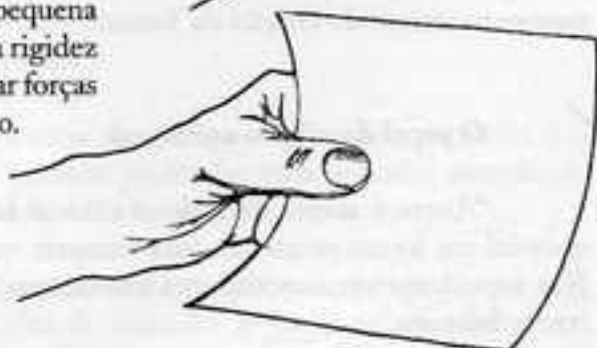
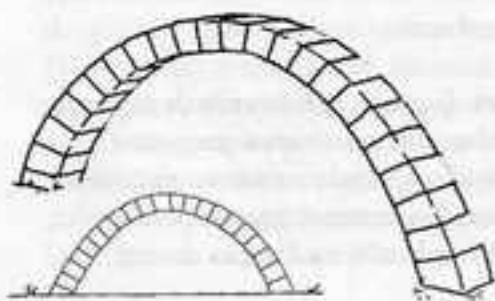
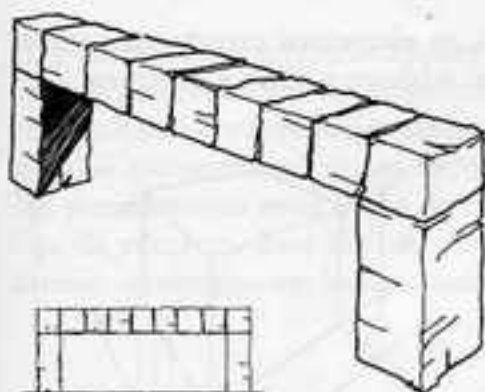
O ato de desenhar um pequeno compartimento de um edifício compromete o autor com a solução da estrutura que lhe dará sustentação.
O que acontece é que nem sempre o criador da arquitetura tem consciência de que no seu ato criador dos espaços está intrínseco o ato criador da estrutura. Quando o criador da foma não se preocupa com o ato gêmeo da concepção estrutural, delegando a outro profissional esta função, corre o risco de ver seu projeto totalmente desfigurado.
O profissional que vem de fora, por mais boa vontade que tenha, nunca conseguirá responder adequadamente aos anseios daquele que viveu o momento íntimo da criação da forma.

O papel do cálculo estrutural

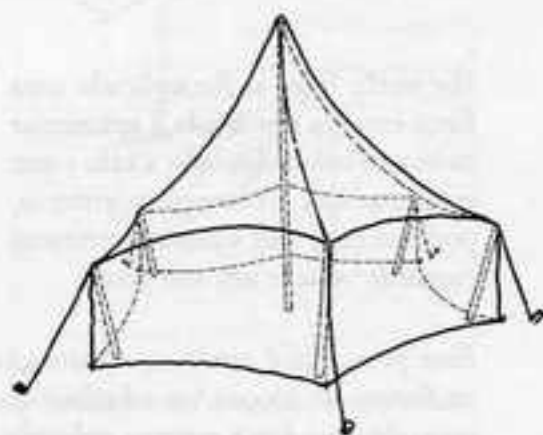
"Antes e acima de todo o cálculo está a idéia, modeladora do material em forma resistente, para cumprir sua missão" (Torroja).
Não é o cálculo que concebe uma forma, mas sim o esforço idealizador da mente humana.
O cálculo existe para comprovar e corrigir o que se intuiu.
O cálculo é uma ferramenta com a qual se manipula um modelo físico.
Para isso, é necessário que a ferramenta seja ajustável ao modelo.
Não tem sentido aplicar-se um modelo matemático - o cálculo - a um modelo físico que não lhe corresponda, pois se chegará a um resultado errado ou, mesmo, a nenhum.
Muitas vezes, a aplicação de um modelo matemático a um modelo físico, tentando descrever seu comportamento da maneira mais próxima do real, torna-se inviável, devido à complexidade dos cálculos envolvidos.
Neste caso, simplificações e pressupostos nem sempre realistas são feitos, para tornar o cálculo processável até para poderosos computadores.
Por isso, é importante ter-se em mente que, por mais precisos que sejam, os cálculos nem sempre conseguem descrever com precisão a realidade.
É preciso colocar a importância dos números em seu devido lugar.

A geometria dos elementos estruturais

Um fio de aço, por mais resistente que seja, não é capaz de suportar a si próprio quando colocado em pé sobre um apoio qualquer; nem será capaz de manter uma forma reta quando apoiado em seus extremos, recebendo uma força transversal ao seu eixo. No entanto, quando pendurado, será bastante eficiente para suportar carga aplicada na direção do seu eixo.

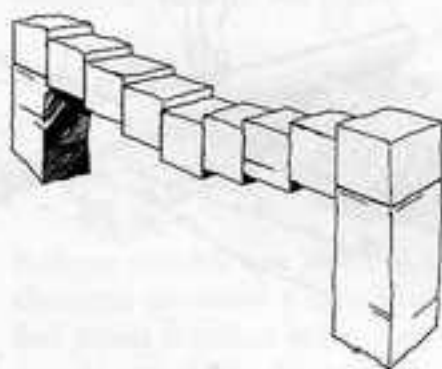
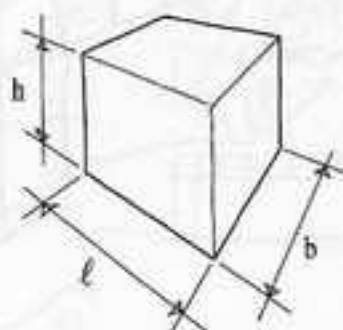
Uma folha de papel não é capaz de suportar a si mesma quando se projeta fora da mão.

Se for dada a essa folha uma pequena curvatura, ela passa a ter uma rigidez maior e a ser capaz de suportar forças perpendiculares ao seu plano.

Pode-se concluir que não é só a resistência do material que garante a um elemento estrutural a capacidade de suportar cargas.
Sua forma é muitas vêzes mais determinante da sua resistência do que a própria resistência do material.
Materiais em princípio frágeis podem ser bem aproveitados estruturalmente quando sua forma for adequadamente projetada para o vão proposto e para o carregamento ao qual estará submetido.
Quando a forma de uma peça estrutural é bem elaborada, ela se traduz em ganho na sua capacidade resistente; entenda-se que isto significa ganho para a própria arquitetura; em muitas ocasiões, a forma do elemento estrutural é determinante da arquitetura.
Os elementos estruturais podem ser usados isoladamente ou agrupados.

O sistema estrutural denominado arco pode ter o bloco de pedra como elemento básico.
Quando esses blocos de pedras são adequadamente agrupados, formam um sistema capaz de vencer vãos e suportar cargas grandes.

No entanto, esses mesmos blocos, quando agrupados de outra forma, são incapazes de vencer vãos significativos ou de suportar qualquer carga.

Um tronco de árvore pode, sozinho, vencer um vão e suportar cargas, quando, por exemplo, utilizado como ponte para a travessia de pessoas.

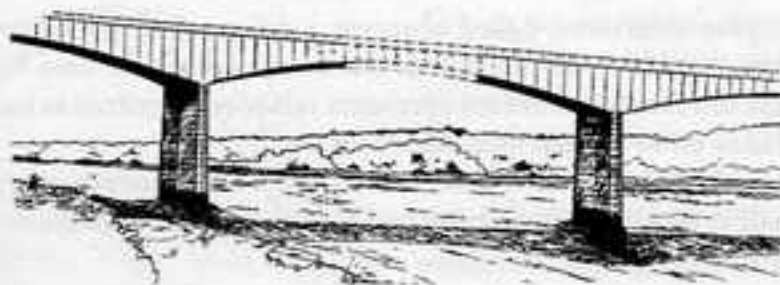
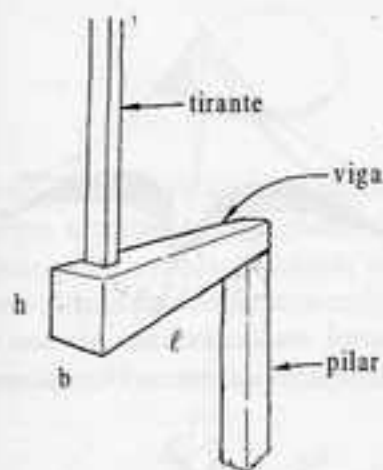
A lona de circo, por outro lado, só consegue cobrir um espaço, ou seja, vencer vão e suportar cargas, quando apoiada em mastros e convenientemente esticada com cabos.

Nos exemplos anteriores, é fácil observar a diferença de geometria que existe entre um bloco de pedra, um tronco de árvore ou uma lona de circo. Cada um desses elementos apresenta relações geométricas bastante diferenciadas entre as suas três dimensões.
São essas relações que atribuem a cada tipo de elemento estrutural características que lhe permitem ou não constituir determinados sistemas estruturais.

Quanto às suas relações geométricas, os elementos estruturais podem ser classificados em três tipos básicos: o bloco, a barra e a lâmina.

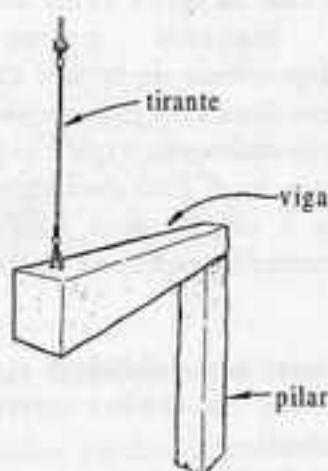
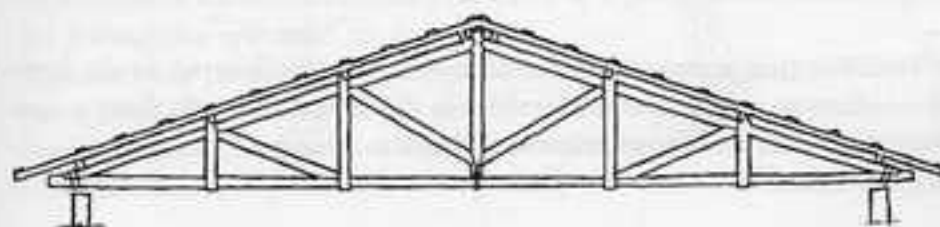
O bloco é um elemento estrutural em que as três dimensões apresentam a mesma ordem de grandeza.

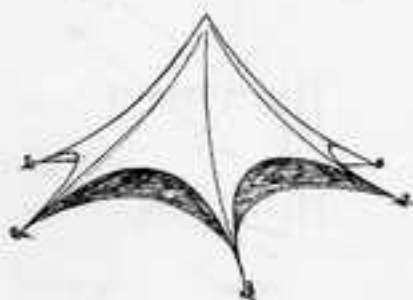
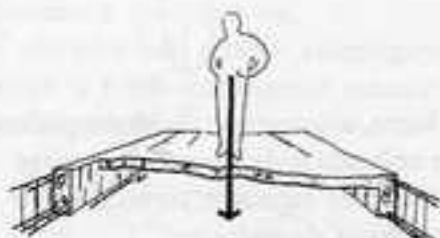
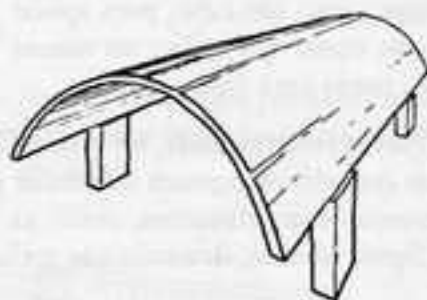
$$\ell \cong h \cong b$$

O bloco só serve como estrutura quando usado em associações nas quais resultem forças internas que tendam a aproximá-los.
Colocados lado a lado , escorregam entre si e não conseguem manter-se na posição.

Por outro lado, se for aplicada uma força externa que tenda a aproximar os blocos colocados lado a lado e que evite que eles escorreguem entre si, pode-se criar um sistema estrutural capaz de vencer um vão reto.

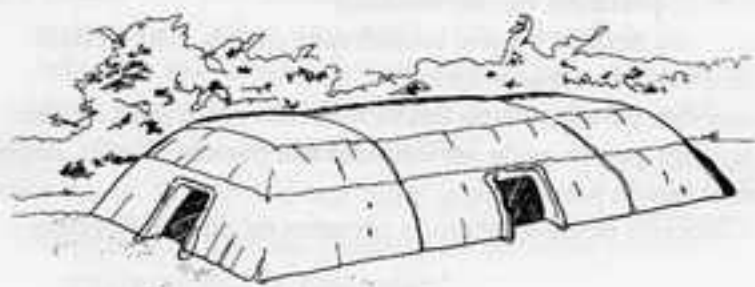
Esse princípio é usado na construção de pontes: elementos pré-fabricados na forma de blocos (as aduelas) são gradualmente juntados entre si por meio de uma força externa aplicada por um cabo.

Essa força tende a apertar as aduelas umas contra as outras e é denominada força de protensão. À medida que esses elementos pré-fabricados vão sendo unidos, a ponte vai-se projetando no vão. Isso é feito em duas frentes de trabalho que se encontram no meio do vão.
Tal procedimento evita o uso de fôrmas de madeira para a execução da viga de concreto. Esse sistema de construção de pontes é denominado sistema construtivo em balaços sucessivos.

A barra é um elemento estrutural em que uma de suas dimensões, o comprimento, predomina em relação às outras duas, largura e altura da secção transversal.

$$b \cong h \gg \ell$$

A barra, ao contrário do bloco, pode ser utilizada isoladamente; não exige associações especiais, como no caso dos blocos de pedra.
A barra é um elemento estrutural de uso mais amplo.
Pode ser utilizada para pendurar cargas, como um cabo, para apoiar cargas, como um pilar, ou vencer vãos, como uma viga.

As barras podem, ainda, ser associadas, criando assim sistemas estruturais mais complexos capazes de vencer grandes vãos; essas barras podem ter pequenos comprimentos, como as que compõem a estrutura mostrada na figura abaixo, denominada treliça.

A lâmina é um elemento estrutural em que duas de suas dimensões, comprimento e largura, prevalecem em relação a uma terceira, a espessura. As figuras mostram três tipos de estruturas em que o elemento estrutural básico pode ser classificado como lâmina.
Apesar de geometricamente todos os elementos serem lâminas, cada um tem características estruturais diferentes dos demais.
O resultado formal que cada elemento estrutural apresenta também difere dos outros dois.

No caso da lona de circo, a forma só se realiza com a colocação de barras verticais ou inclinadas (o mastro) e pela ação de barras esticadas (o cabo ou tirante). Qualquer alteração na posição de um desses elementos resultará em uma nova forma.

No caso da laje, a forma da lâmina se mantém permanente, independente de fatores externos. Além disso, a laje pode ser executada horizontalmente, o que é impossível com a lona. Essa característica da laje é obtida com um grande aumento na espessura da lâmina.

A terceira possibilidade estrutural de uso da lâmina aparece na abóbada.
Sua forma mantém-se constante, para qualquer situação externa, sem que para isso haja necessidade de grande aumento na espessura.
A sua resistência é determinada pela curvatura que lhe é dada.

As lâminas que apresentam características semelhantes às da lona denominam-se membranas. Membranas são lâminas muito finas e que apresentam resistência apenas no seu plano.
Cargas perpendiculares ao seu plano provocam alteração na sua forma.

A membrana tende sempre a adquirir a forma do carregamento que a solicita.
Uma bexiga cheia de água terá a forma de uma gota, suspensa ou apoiada sobre um plano.

Pode-se diminuir o efeito de mudança de forma nas membranas, devido a cargas normais ao seu plano, aumentando-se o esforço aplicado no seu plano. Em outras palavras, uma lona bem esticada apresenta maior estabilidade de forma para cargas normais ao seu plano.
O uso de estruturas com lonas infladas com ar é uma aplicação desse princípio. O ar estica a lona, aumentando sua estabilidade a cargas externas.

As lâminas que apresentam características semelhantes à laje são denominadas placas.
As placas são lâminas que, devido à sua maior rigidez, apresentam a capacidade de vencer vãos, suportando cargas transversais ao seu plano, sem a necessidade de aplicacão de cargas adicionais no seu plano.
Associando-se a propriedade peculiar da membrana - pequena espessura - com a da placa - resistência a cargas normais ao seu plano - obtemos um terceiro tipo de lâmina: a casca.
A resistência transversal obtida pela casca só é possível devido a curvaturas ou dobraduras aplicadas em seu plano.
Quanto mais predominar o efeito de membrana, ou seja, quanto mais os esforços se distribuirem no seu plano, mais esbelta será a casca.
Isso é possivel com uma adequada relação entre a forma da casca e o carregamento que a solicita.

Forças que atuam nas estruturas

Conceito de direção e sentido

Quando alguém anda por uma rua reta e, de repente, entra numa de suas travessas, o caminho que percorre muda bruscamente de direção. Se, por outro lado, a rua pela qual caminha tiver uma curva, ao percorrer esta curva, a partir do seu início e em cada ponto da curva, a pessoa também estará mudando de direção.

No caso anterior, quando se entra numa travessa, a mudança de direção, apesar de brusca, ocorre apenas uma vez; no caso da curva, ocorrem muitas mudanças de direções.

É sabido que, para se garantir que um objeto esteja em movimento, é necessário que esse movimento seja relacionado a um referencial.

Por exemplo: quando duas pessoas andam lado a lado, com a mesma velocidade, e uma delas olha para a outra, ela a verá sempre ao seu lado, como se estivesse parada.

O mesmo não ocorre a uma terceira pessoa parada, que verá as duas primeiras afastando-se e, portanto, em movimento.

No entanto, essa terceira pessoa, considerada parada, não o estará para uma quarta que a visse do espaço sideral.

Essa pessoa, dita parada, estaria em movimento junto com o planeta Terra.

Logo, a terceira pessoa pode ser considerada parada ou não, dependendo da referência que se tome.

Como no conceito de movimento, o conceito de direção também exige um referencial.

Se não for levado em conta um referencial qualquer, direção será algo sem nexo.

A direção de uma rua ou estrada tem que ser definida em relação a alguma referência, como, por exemplo, a linha do equador, a agulha de uma bússola, ou outra qualquer.

Pode-se escolher qualquer referencial para se definir a direção, mas, uma vez escolhido, esse referencial deve ser fixo e conhecido para que todos possam ter a mesma interpretação dos acontecimentos.

Define-se como direção de uma reta qualquer o ângulo que ela forma com outra reta bem conhecida, denominada referencial.

A reta que vai do ponto de localização de uma pessoa ao pólo magnético da terra, dada pela agulha de uma bússola, por exemplo, é um referencial bem definido e normalmente utilizado.

A direção do vôo de um avião é definida pelo ângulo que sua rota forma com a direção dada pela bússola.

Uma mesma direção ou rota, por exemplo, a rota entre São Paulo e Rio de Janeiro pode ser ocupada por um avião que vai de São Paulo para o Rio e outro que vai do Rio para São Paulo.
Os dois aviões estão indo na mesma direção mas em sentidos contrários.
Portanto, definida uma direção, para se caracterizar corretamente o movimento deve-se informar também o sentido.
É muito comum haver uma certa confusão nos conceitos de direção e sentido.
É comum ocorrer o engano de se dizer que determinado veículo está indo na direção de São Paulo para o Rio de Janeiro e o outro, que está na mesma estrada, mas em sentido contrário, dizer-se que está na direção contrária, o que é um erro grosseiro.
A direção é a mesma: São Paulo - Rio de Janeiro ou Rio de Janeiro - São Paulo; o que muda é o sentido.

Conceito de força

Sempre que um corpo, com uma determinada massa, estiver em repouso e iniciar um movimento ou, ainda, quando já em movimento retilíneo (movendo-se sobre uma reta), com velocidade constante, tiver sua velocidade e/ou sua direção alterada, diz-se que a ele foi aplicada uma força. Portanto, a idéia de força está ligada às noções de massa, aceleração (alteração na velocidade), direção e sentido.
Matematicamente, define-se força como o produto: $F = M . \delta$
Força é uma grandeza vetorial, porque para defini-la corretamente não é suficiente apenas quantificá-la, mas indicar, também, sua direção e sentido.

Tipos de forças que atuam nas estruturas

Neste trabalho, já se definiu estrutura como o caminho das forças. Mas, que forças? É absolutamente necessário que as forças que atuam nas edificações sejam muito bem conhecidas, na sua intensidade, direção e sentido, para que a concepção estrutural seja coerente com o caminho que essas forças devem percorrer até o solo e para que os elementos estruturais sejam adequadamente dimensionados.
As forças externas que atuam nas estruturas são denominadas cargas.
Algumas cargas atuam na estrutura durante toda a sua vida útil, enquanto outras ocorrem esporadicamente.
Denominam-se cargas permanentes as que ocorrem ao longo de toda a vida útil e cargas acidentais as que ocorrem eventualmente.

Cargas permanentes

As cargas permanentes são cargas cuja intensidade, direção e sentido podem ser determinados com grande precisão, pois as cargas permanentes são devidas exclusivamente a forças gravitacionais, ou pesos.
São exemplos de cargas permanentes:

O peso próprio da estrutura. Para determiná-lo, basta o conhecimento das dimensões do elemento estrutural e do peso específico (peso / m3) do material de que é feito;

O peso dos revestimentos de pisos, como contrapisos, pisos cerâmicos, entre outros;

O peso das paredes. Para determiná-lo, é necessário conhecer o peso específico do material de que é feita a parede e do seu revestimento (emboço, reboco, azulejo e outros);

O peso de revestimentos especiais, como placas de chumbo, nas paredes de salas de Raio X. Para determiná-lo, é necessário o conhecimento das dimensões e do peso específico desses revestimentos.

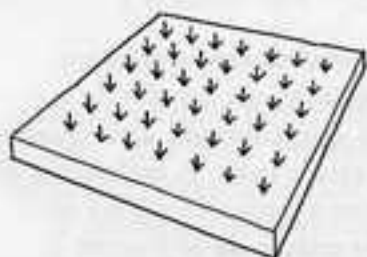
Cargas acidentais.

As cargas acidentais são mais difíceis de ser determinadas com precisão e podem variar com o tipo de edificação.
Por isso, essas cargas são definidas por Normas, que podem variar de país para país. No Brasil, a norma que determina os valores das cargas acidentais é a NBR 6120, da Associação Brasileira de Normas Técnicas.
São exemplos de cargas acidentais, prescritas pela Norma:

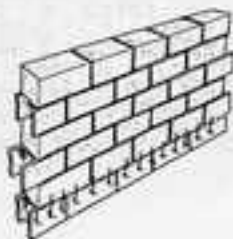
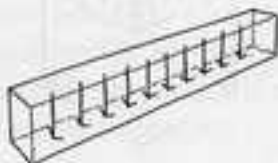
O peso das pessoas;
O peso do mobiliário;
O peso de veículos;
A força de frenagem (freio) de veículos.
É um força horizontal, que depende do tipo de veículo;
A força do vento.
É uma força horizontal, que depende da região, das dimensões verticais e horizontais da edificação;
O peso de móveis especiais, como cofres, não é determinado pela Norma e deverá ser informado pelo fabricante do mobiliário.

Obs. - O efeito da chuva, como carregamento, apesar de acidental, é levado em conta no peso das telhas e dos revestimentos, já que são sempre considerados encharcados.

Distribuição das cargas nos elementos estruturais. Geometria das cargas

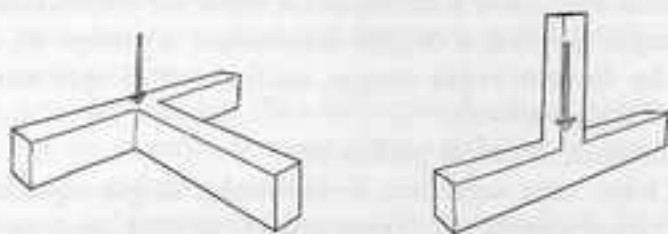
A distribuição de cargas sobre uma estrutura pode ser diferente de um ponto para outro. As cargas que atuam sobre uma viga podem se distribuir de maneira diferente das que atuam sobre uma laje.
Normalmente, a geometria dos carregamentos acompanha a geometria dos elementos estruturais sobre os quais eles atuam. As cargas podem atuar de maneira uniforme sobre a estrutura ou variar de intensidade ponto a ponto. As cargas que têm a mesma intensidade ao longo do elemento estrutural são denominadas cargas uniformes; as que variam são denominadas cargas variáveis.
Quanto à geometria, as cargas podem ser:
Distribuidas sobre uma superfície, denominadas cargas superficiais. São exemplos de cargas superficiais: o peso próprio de uma laje,o peso próprio de revestimentos de pisos, o peso de um líquido sobre o fundo do seu recipiente, o empuxo de um líquido sobre as paredes do recipiente que o contém e as cargas acidentais definidas pela Norma.

Essas cargas são representadas graficamente por um conjunto de setas dispostas sobre uma área.

Seguem-se exemplos de cargas acidentais superficiais definidas pela Norma:
cargas acidentais sobre pisos residenciais (pessoas, móveis, etc.) = 150 kgf/m2;
cargas acidentais sobre pisos de escritórios = 200 kgf/m2;
cargas acidentais sobre pisos de lojas = 400 kgf/m2;
cargas acidentais devidas ao vento = 50 a 100 kgf/m2. (consideradas horizontais e/ou inclinadas).

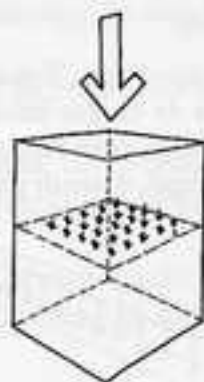
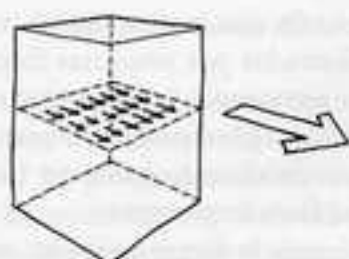
Distribuídas sobre uma linha, denominadas cargas lineares.
São exemplos de cargas lineares: o peso próprio de uma viga, o peso de uma parede sobre uma viga ou uma placa, as cargas depositadas por uma laje sobre as vigas, e assim por diante.

Essas cargas são representadas graficamente por um conjunto de setas dispostas sobre uma linha.

Localizadas em um ponto, denominadas cargas pontuais ou cargas concentradas.

São exemplos de cargas concentradas: uma viga apoiada sobre outra, um pilar que nasce numa viga ou numa placa, o peso próprio de um pilar, e assim por diante.

Essas cargas são representadas graficamente por uma seta isolada.

Tensão

Ninguém duvida que o aço é um material mais resistente do que, por exemplo, o algodão. Mas, isso não garante que um fio de aço resista mais do que um fio de algodão. Desde que colocada uma quantidade suficiente de algodão, o seu fio poderá resistir mais. A resistência de um elemento estrutural depende da relação entre a força aplicada e a quantidade de material sobre a qual a força age. A essa relação dá-se o nome de tensão. Em outras palavras, a tensão é a quantidade de força que atua em uma unidade de área do material. Só podemos comparar a resistência de dois materiais comparando as máximas tensões que eles podem resistir, ou em outras palavras, o quanto de força por unidade de área eles suportam.

Quando a força é aplicada perpendicularmente à superfície resistente, a tensão denomina-se tensão normal.

Quando a força aplicada for paralela, ou melhor, tangente à superfície resistente, a tensão denominar-se-á tensão tangencial ou tensão de cisalhamento.

É importante distinguir que tipo de tensão está ocorrendo em determinado elemento estrutural, pois os materiais apresentam capacidades diferentes, conforme sejam solicitados por um ou outro tipo de tensão. Em seguida, são dados alguns exemplos de materiais e suas respectivas tensões máximas de trabalho:

Aço tipo A-36:	σ =	1.500	kgf/cm2 (tensão normal);
	τ =	800	kgf/cm2 (tensão de cisalhamento).
Peroba:	σ =	90	kgf/cm2 (tensão normal);
	τ =	12	kgf/cm2 (tensão de cisalhamento).
Concreto:	σ =	250	kgf/cm2 (tensão normal);
	τ =	6	kgf/cm2 (tensão de cisalhamento).

As estruturas, quando submetidas a tensões, devem trabalhar com uma certa folga, para que imprevistos, tais como falhas de material, impossibilidade de execução ideal, e outros efeitos imprevistos, não ponham em risco a resistência da estrutura.

Nenhuma estrutura trabalha dentro dos seus limites de resistência, mas em um regime um pouco abaixo desse limite.

A esse regime de trabalho dá-se o nome de regime de segurança e as tensões atuantes são denominadas tensões admissíveis.

A determinação das tensões admissíveis é feita pela aplicação de um coeficiente de segurança às tensões limites do material.

Os coeficientes de segurança variam de material para material e são obtidos estatisticamente, dependendo da maior ou menor confiabilidade do material.; no aço, esse coeficiente é da ordem de 1,4 , no concreto armado, 2 e, em algumas madeiras, chega a 9.

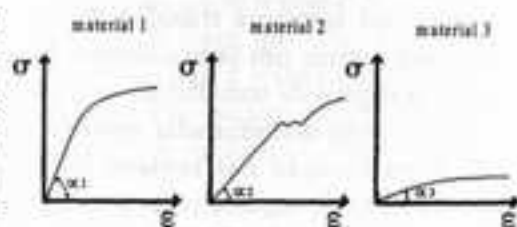
Todo material, quando submetido a tensão, apresenta um deslocamento nas suas moléculas, que é denominado deformação.

Quanto mais solicitado o material, mais ele se deforma.

Como as tensões são invisíveis ao olho humano, uma maneira de se saber se um elemento estrutural está mais ou menos solicitado é pela verificação do quanto ele se deformou.

Alguns materiais são mais deformáveis do que outros, apresentando deformações elevadas mesmo quando solicitados por pequenas forças.
A deformabilidade visível dos materiais estruturais é uma característica bastante desejável, já que grandes deformações podem avisar sobre problemas na estrutura. Entre a situação de descarregamento total e a ruptura, os materiais passam por algumas fases importantes.
Enquanto as deformações forem proporcionais às forças aplicadas, ou seja, se ao se duplicar a força o material tiver a sua deformação duplicada; se ao se triplicar a força sua deformação triplicar e assim por diante, o material é considerado trabalhando no regime elástico.
Nesta fase, quando se deixa de aplicar a força, o material volta a ter a sua dimensão original. O elástico de borracha é um elemento que representa bem essa situação.
Se a força aplicada atingir valores acima de um determinado limite, pode-se notar que o material muda de comportamento, não mais apresentando deformações proporcionais ao aumento da força.
A esta fase dá-se o nome de regime plástico.
Nesta situação, o material, quando descarregado, passa a apresentar uma deformação permanente.
Ao final do regime plástico, com o aumento de carga, temos a ruptura do material. Alguns materiais apresentam, na passagem do regime elástico para o plástico, um grande aumento na deformação sem aumento na intensidade da força. Esta situação caracteriza o fenômeno denominado escoamento do material. A relação entre a força aplicada e a deformação ocorrida pode ser colocada em gráfico.

Para que o gráfico represente o comportamento do material, independentemente das dimensões do elemento que serviu de base para o ensaio, são colocadas no gráfico, em vez das forças aplicadas, suas respectivas tensões e, em vez da deformação total da barra, cujo valor varia com o comprimento inicial, é usada a deformação específica, que é a relação entre a deformação real e o comprimento inicial da barra.
Dessa forma, obtém-se gráficos semelhantes aos mostrados abaixo, e que são denominados gráficos tensão x deformação.

onde $\sigma = \frac{F}{A}$; $\varepsilon = \frac{\Delta}{L}$; $E = \text{tg}\,\alpha = \frac{\sigma}{\varepsilon}$

onde σ = tensão;
ε = deformação específica;
E = módulo de elasticidade

Módulo de elasticidade

Observando eses gráficos, nota-se que na parte em que o gráfico é uma reta, correspondendo à região de regime elástico do material, ou seja, na qual há proporcionalidade entre tensão e deformação, sua inclinação varia de material para material. Essa variação nos mostra que, para uma mesma tensão, existem materiais que se deformam mais do que outros. Quanto maior for o ângulo α, ou seja, quanto mais inclinada for a reta, menos deformável é o material. Conclui-se que a inclinação dessa reta nos informa quão deformável é o material.

A essa inclinação dá-se o nome de módulo de Young ou módulo de elasticidade, que é uma constante para cada tipo de material.

O módulo de elasticidade do aço é de 2.100.000 kgf/cm2, o do concreto é da ordem de 210.000 kgf/cm2. Esses valores mostram que o concreto é um material 10 vezes mais deformável que o aço, o que a princípio contraria a intuição, que tende a indicar o contrário. Isso se deve à maneira como os dois materiais são aplicados nas estruturas.

As peças de aço, devido à sua resistência maior, são mais esbeltas e as de concreto, ao contrário, mais volumosas.

Assim, em razão de suas dimensões, as peças metálicas tendem a ser mais deformáveis.

Além do conceito de módulo de elasticidade, os gráficos de tensão x deformação apresentam uma relação bastante importante, que descreve a maneira como o material se relaciona com as tensões a ele aplicadas e com as suas respectivas deformações.

Essa relação é particularmente importante no regime elástico, pois permite a solução de diversos problemas de dimensionamento de elementos estruturais.

Essa relação recebe o nome de Lei de Hooke e pode ser expressa matematicamente pela seguinte equação: $\sigma = E \cdot \varepsilon$

σ : Tensão aplicada ao material;
E : Módulo de elasticidade do material;
ε : Deformação específica
(deformação efetiva dividida pelo comprimento inicial da barra).

Equilíbrio

Entre as propriedades desejadas para as estruturas, a mais importante é que, quando submetidas às mais diferentes forças, possam manter-se em equilíbrio durante toda a sua vida útil.

Diz-se que um objeto está em equilíbrio quando não há alteração no estado das forças que atuam sobre ele.
Uma espaçonave, no espaço sideral, longe do efeito gravitacional dos astros, desloca-se com velocidade constante e em trajetória retilínea. Nesta situação, a espaçonave encontra-se em equilíbrio. Já um objeto sobre uma mesa, manter-se-á no lugar indefinidamente, desde que sobre ele não seja aplicada outra força, a não ser o seu próprio peso e a reação da mesa. Neste caso, o objeto encontra-se também em equilíbrio. No exemplo da espaçonave, o equilíbrio ocorre, mas existe movimento. Este é o equilíbrio dinâmico. No caso do objeto sobre a mesa, não há movimento, o objeto permanece parado; é o equilíbrio estático.
É este último exemplo que interessa para as edificações, que, para existir, devem permanecer em equilíbrio estável durante toda a sua vida útil.

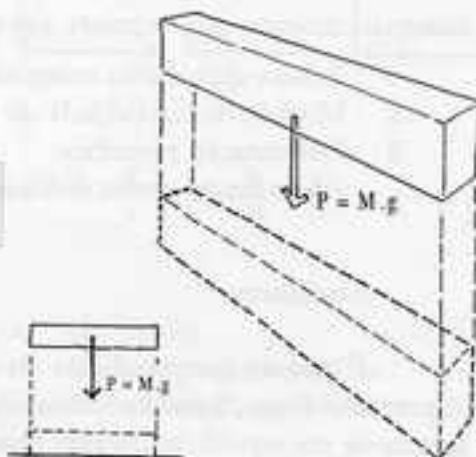
Condições de equilíbrio das estruturas

Para uma estrutura permanecer em equilíbrio estático é necessário, mas não suficiente, que as dimensões de suas secções sejam corretamente determinadas. Embora corretamente dimensionada, a estrutura pode perder o equilíbrio se seus apoios ou as ligações entre as partes que a constituem, denominados vínculos, não forem corretamente projetados. Por outro lado, o correto projeto dos vínculos não garante a estabilidade da estrutura se as dimensões das suas secções forem menores que as necessárias. Portanto, para estar totalmente em equilíbrio estático, uma estrutura deve atender a esta condição tanto externamente, pelo equilíbrio nos seus vínculos, como internamente, pelo equilíbrio das forças que ocorrem dentro das suas secções.

Equilíbrio Estático Exten

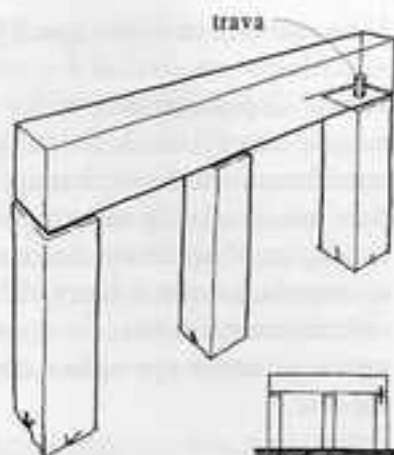
Considere-se a barra da figu representada ao lado:

M = massa
g = aceleração da gravidade

A ação da gravidade sobre sua massa provoca o aparecimento da força peso. Sob a ação dessa força, a barra tende a se deslocar na vertical, em direção ao centro da Terra.

Uma maneira de evitar que a barra se desloque na vertical é a criação de um dispositivo que exerça uma reação contrária à força peso, equilibrando-a. Suponhamos que, para isso, se crie um suporte. Nestas condições, o equilíbrio ainda não é alcançado, já que a barra tende a continuar movimentando-se, só que agora girando em torno do seu suporte.

Para evitar o giro, podemos criar outro suporte. Desta forma, a barra não irá movimentar-se na vertical e nem girar. Ainda assim, o equilíbrio estático da barra não estará garantido, já que a aplicação de uma força horizontal poderá deslocá-la nessa direção.

Para evitar esse movimento, pode ser colocado num dos suportes uma trava. Assim, qualquer que seja a força que atue sobre a barra, desde que no seu plano, esta permanecerá indeslocável, ou seja, em equilíbrio estático. Portanto, para um elemento estrutural estar em equilíbrio estático no seu plano, é condição necessária e suficiente que ele não se desloque na vertical, não se desloque na horizontal e nem gire. Estas são as três condições mínimas necessárias para que ocorra o equilíbrio estático no plano.
Este raciocínio pode ser extrapolado para o espaço.

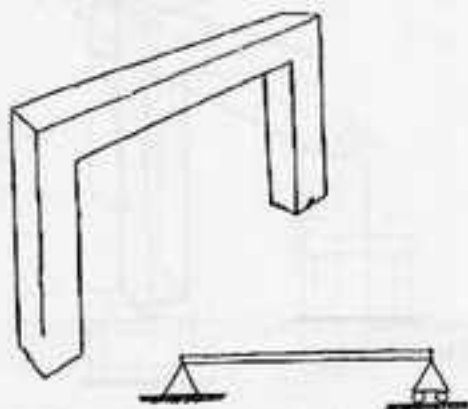
Se for acrescentado à barra mais um suporte, como mostrado na figura ao lado, haverá um aumento nas condições iniciais de equilíbrio.
A barra estará com condições de equilíbrio estático, acima das condições mínimas necessárias para que ele ocorra. Se, ao contrário, for retirado um dos apoios, mantendo-se apenas um, a barra ficará em condições de estabilidade abaixo das mínimas necessárias.

Uma estrutura que se encontra em condições mínimas necessárias de estabilidade é denominada isostática (iso, radical grego que significa igual).
Quando as condições de estabilidade estão acima das mínimas, dizemos que a estrutura é hiperestática (hiper, radical grego que significa acima).
Quando as condições de estabilidade estiverem abaixo das mínimas, a estrutura é dita hipostática (hipo, radical grego que significa abaixo).
Estruturas hipostáticas são estruturas que não se encontram em equilíbrio estático e, em conseqüência, não interessam ao universo das estruturas de edificações, pois tendem a cair.
Conclui-se, portanto, que se deve trabalhar somente com estruturas isostáticas ou hiperestáticas.
Para identificar se uma estrutura é hipo, iso ou hiperestática deve-se analisar suas possibilidades de movimento quando submetida a quaisquer condições de carregamento.
Para essa análise, deve-se verificar em que direções os nós, que ligam elementos da estrutura, permitem movimentos.
Esses nós , como já foi comentado, são denominados vínculos.
São vínculos: a ligação entre uma laje e uma viga, uma viga e um pilar, uma viga com outra viga, a ligação entre as barras que formam uma malha estrutural, e assim por diante.
Os vínculos podem ou não permitir movimentos relativos entre os elementos por eles unidos.
Um vínculo que permite giro e deslocamento relativos é denominado vínculo articulado móvel. Articulado porque permite o giro, móvel porque permite o deslocamento em uma direção, normalmente a horizontal.

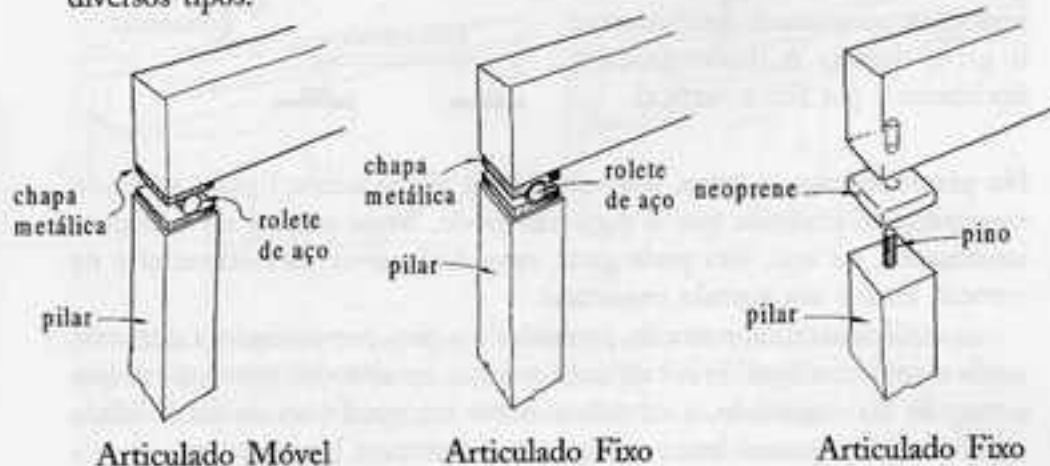
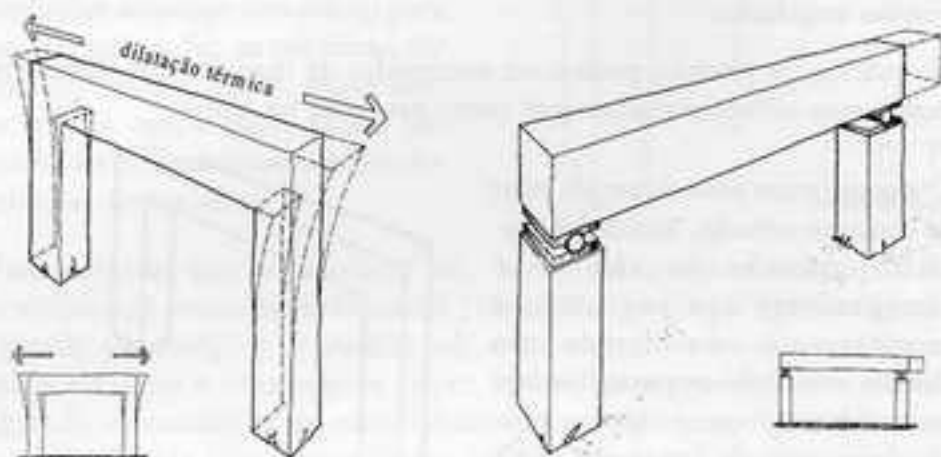
Esse vínculo é representado graficamente como mostrado na figura ao lado.

O vínculo que permite apenas o giro relativo é denominado vínculo articulado fixo.

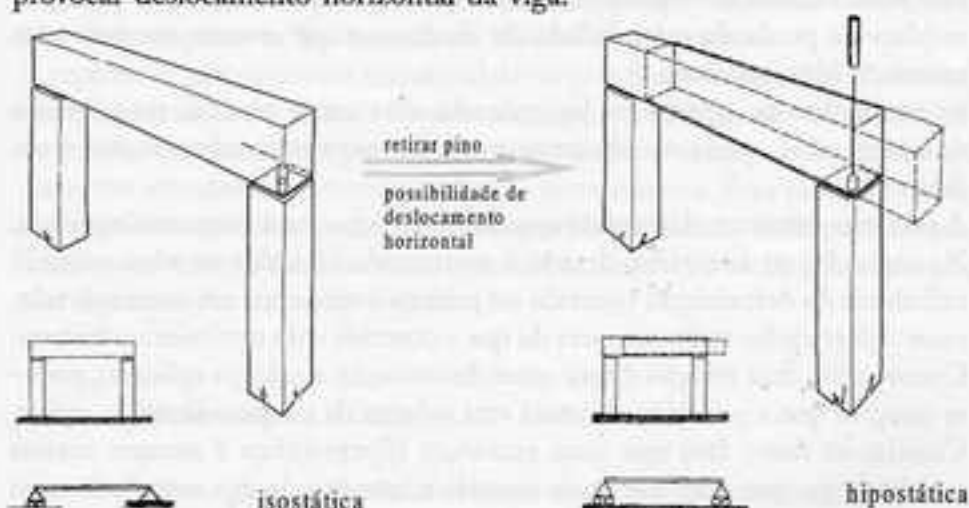
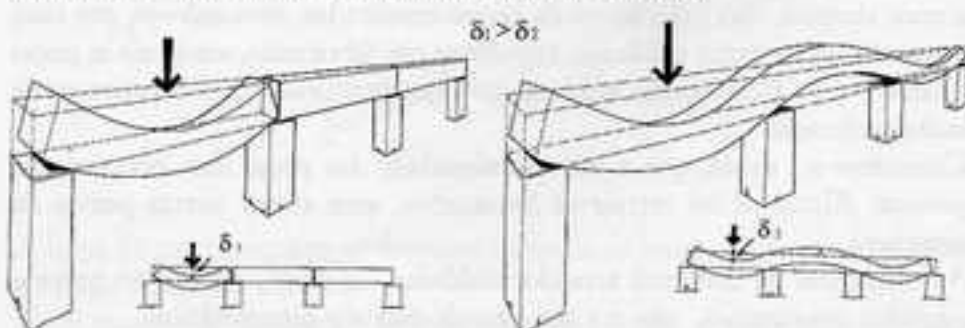
O vínculo que impede o giro e os deslocamentos é denominado vínculo engastado.

Na prática, os vínculos podem ser executados de maneira que trabalhem exatamente ou aproximadamente como pensados na teoria.

O vínculo entre uma viga e um pilar de concreto armado, moldados "in-loco", quando o vão e o carregamento são pequenos, é teoricamente considerado um vínculo articulado, o que não ocorre na realidade, já que a viga e o pilar são executados de forma que não é possível ocorrer o livre giro de um em relação ao outro.

Quanto maiores forem os vãos ou os carregamentos a que está submetida a estrutura, os vínculos devem ser projetados de forma que apresentem as condições de comportamento idênticas às pensadas na teoria.
Na figura abaixo, são apresentadas algumas formas de se projetar vínculos articulados fixos e móveis, que se comportam, na realidade, como pensados na teoria.
Obs.: o neoprene é um tipo de borracha que permite deformações de diversos tipos.

Articulado Móvel | Articulado Fixo | Articulado Fixo

A opção por um ou outro tipo de vínculo depende do modelo físico idealizado para o comportamento da estrutura.
Assim, quando se quer que as dilatações térmicas de uma viga não influenciem os pilares sobre os quais ela se apoia, projeta-se um vínculo articulado móvel num dos pilares de apoio da viga, de maneira que ela possa dilatar-se livremente sem aplicar uma força horizontal ao pilar.

Alterando um vínculo, pode-se aumentar ou diminuir os graus de liberdade de movimento relativo entre as partes ligadas.
Pode-se fazer com que um vínculo, por exemplo, o apoio de uma viga num pilar, que inicialmente não permitia qualquer movimento, possa gradativamente perder suas restrições, propiciando inicialmente o giro, depois o deslocamento horizontal e por fim o vertical.

No primeiro caso, a barra horizontal está rigidamente ligada ao apoio esquerdo, de maneira que a viga não pode, nesse ponto, ter qualquer movimento, ou seja, não pode girar, nem deslocar-se na horizontal e na vertical. Esse é um vínculo engastado.
Se, ao se eliminar uma restrição, permitindo o giro, por exemplo, a estrutura ainda mantiver o equilíbrio estático é porque, na situação anterior, em que o vínculo era engastado, a estrutura estava em condições de estabilidade superiores às mínimas; era, portanto, uma estrutura hiperestática.

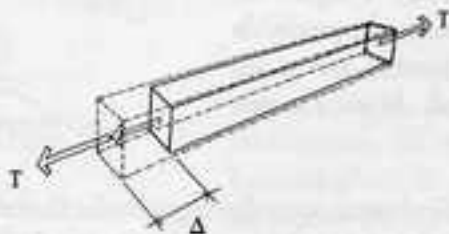
Se, ao contrário, após a liberação do giro, a estrutura perder seu equilíbrio estático, é porque ela estava em condições mínimas de estabilidade; era, portanto, uma estrutura isostática. Esse procedimento, de liberar gradativamente os movimentos dos vínculos da estrutura, permite que se verifique se ela é hiperestática, isostática ou mesmo hipostática.
A figura a seguir mostra uma estrutura isostática, pois a liberação do movimento horizontal no seu apoio à direita, pela eliminação do pino, faz com que a estrutura torne-se hipostática, já que uma força horizontal pode provocar deslocamento horizontal da viga.

É fácil concluir que o uso de estruturas hipostáticas deve ser totalmente evitado, já que são estruturas não estáveis, restando a possibilidade das estruturas isostáticas e hiperestáticas.
Qual delas é melhor ? Para responder a esta pergunta, observem-se as duas situações de vigamento apresentadas na figura abaixo.

Nas duas situações, temos uma estrutura com três vãos, lembrando que se chama vão o espaço livre entre os apoios da barra, também denominado tramo. A diferença substancial entre os dois casos reside no fato de que os vínculos que fazem a ligação entre os tramos são diferentes.

No primeiro caso, os vários tramos são independentes, já que cada um pode girar ou deslocar-se no pilar sem qualquer interferência do tramo vizinho.
No segundo caso, os tramos estão intimamente ligados, de forma que qualquer movimento em um tramo interfere nos demais.
No primeiro caso, temos uma estrutura isostática, bastando ver que a eliminação de um dos pilares, por exemplo, é suficiente para que se perca a estabilidade do sistema.
Isso já não ocorre no segundo caso, em que a retirada de qualquer pilar não implica na perda da estabilidade do sistema, o que mostra ser esta uma estrutura hiperestática.
Se em ambas as estruturas for aplicada uma carga vertical, no primeiro dos seus vãos, pode-se observar que elas sofrerão deformações bem diferentes.
A primeira estrutura deformará apenas no vão em que a carga está aplicada.
Na segunda, ao contrário, devido à continuidade, todos os vãos sofrerão influência da deformação ocorrida no primeiro vão, mas, em contrapartida, essas deformações serão menores do que a ocorrida com a primeira estrutura.
Como existe uma relação direta entre deformação e esforço aplicado, pode-se concluir que a primeira estrutura está submetida a uma solicitação maior.
Conclui-se deste fato que uma estrutura hiperestática é sempre menos solicitada do que uma estrutura isostática, resultando em estruturas com menor consumo de material.
Além disso, as estruturas hiperestáticas, por apresentarem em condições de estabilidade acima das mínimas, são estruturas com um grau de segurança maior.
As estruturas isostáticas, por sua vez, têm a vantagem de serem mais facilmente analisadas do ponto de vista do cálculo, pois seu comportameto é mais simples. São mais fáceis de serem executadas, tornando-se, por isso, uma solução bastante usada nas estruturas pré fabricadas, nas quais as peças menores e de fácil ligação entre sí são mais vantajosas para o processo de industrialização.
Considere-se, ainda, que a não continuidade das peças lhes permite que possam dilatar-se ou retrair-se livremente, sem afetar outras partes da estrutura.
As estruturas de concreto armado moldadas "in-loco", devido ao próprio processo construtivo, são em sua grande maioria hiperestáticas.
As estruturas metálicas, de madeira e os pré-moldados de concreto, devido ao processo mais industrializado, executado através da montagem de componentes e visando à simplificação das ligações entre eles, são normalmente estruturas isostáticas.

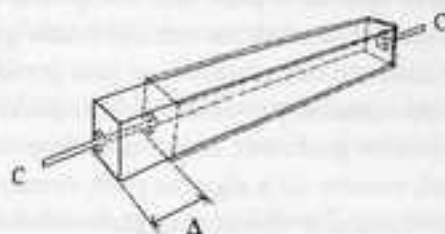
Equilíbrio estático interno

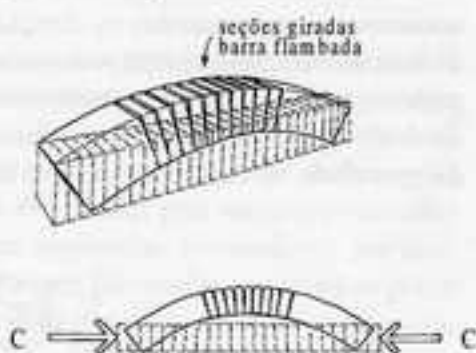
O equilíbrio externo de uma estrutura é condição necessária, mas não suficiente, para a sua existência. Mesmo uma estrutura com grande grau de estabilidade, como as estruturas hiperestáticas, pode perder a sua estabilidade, se o material da qual é composta, não for capaz de reagir às tensões internas, rompendo-se e perdendo o equilíbrio interno.
Semelhante ao caso do equilíbrio externo, para que ocorra o equilíbrio interno, é necessário que as seções que compõem o elemento estrutural não se desloquem na horizontal, na vertical e não girem.
A ruptura de um elemento estrutural dá-se pela perda do equilíbrio interno, ou seja as tensões no material provocam algum deslocamento relativo entre as seções. Como não se pode ver o que acontece dentro da seção de um elemento estrutural, recorre-se a alguma pista externa. Essa pista é a forma como o elemento estrutural se deforma quando submetido às forças externas. Existe uma relação direta entre o que ocorre dentro do elemento estrutural e as deformações externas visíveis.

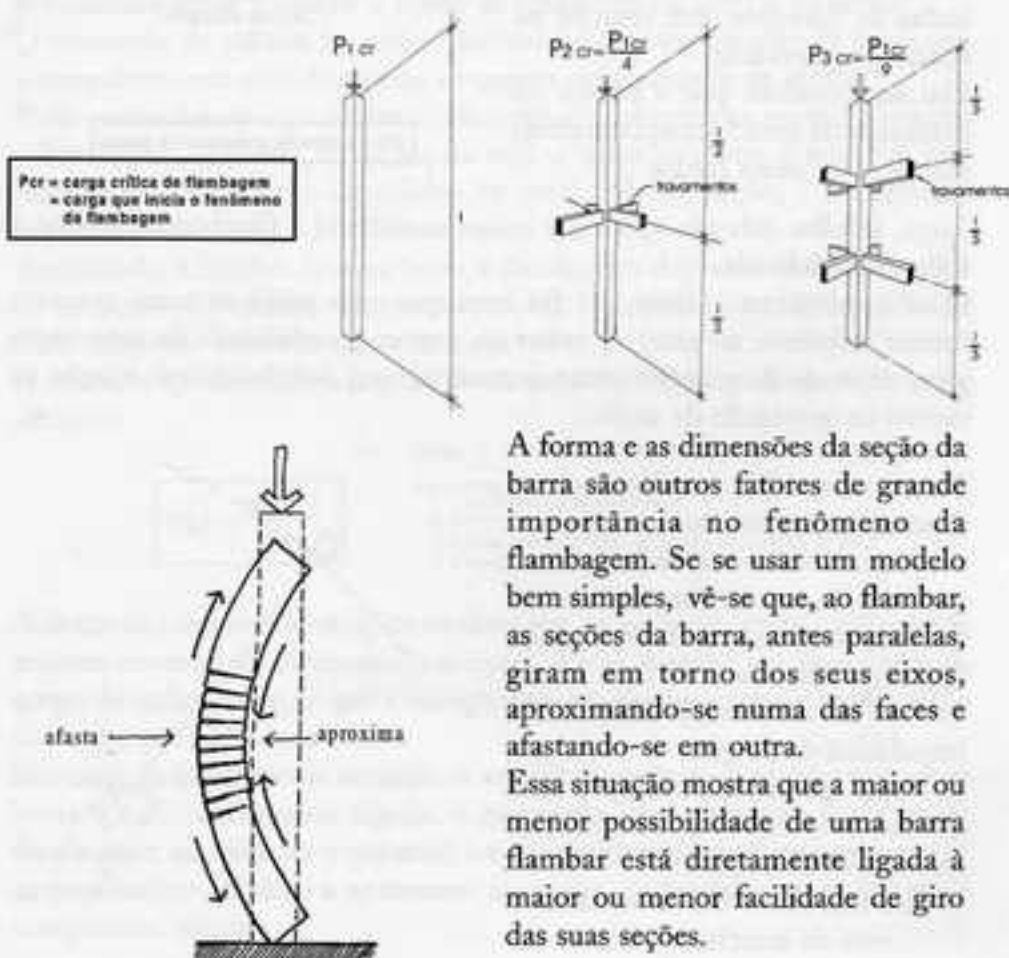
Tração simples ou axial

Se uma barra, quando submetida a forças externas, sofre um aumento no seu tamanho, na direção do seu eixo, e se esse aumento ocorre de forma uniforme, ou seja, todas as suas fibras sofrem a mesma deformação, pode-se concluir que internamente a barra está sujeita a uma força atuando de dentro para fora, normal ao plano da sua seção e aplicada no seu centro de gravidade. A esta força dá-se o nome de tração simples ou axial.

A força de tração simples se distribui na seção da barra, provocando tensões normais de tração simples.
Essas tensões são uniformes ao longo de toda a seção, já que a tração simples provoca uma solicitação uniforme de todas as fibras da seção.
Neste caso, o equilíbrio interno será obtido quando o material for suficientemente resistente para reagir às tensões que, provocadas pelas forças de tração simples, tendem a afastar as seções.

Compressão simples ou axial e flambagem

Se a barra, quando submetida a forças externas, sofre uma diminuição no seu tamanho, na direção do seu eixo, e se essa diminuição ocorre de forma uniforme, ou seja, todas as suas fibras sofrem a mesma deformação, pode-se concluir que internamente a barra está sujeita a uma força atuando de fora para dentro, normal ao plano da sua seção e aplicada no centro de gravidade dessa seção. A esta força dá-se o nome de compressão simples ou axial.

Além do sentido em que se deformam, há um comportamento bastante diferenciado entre uma barra sujeita a tração simples e outra sujeita a compressão simples.
Se, em uma barra tracionada, a força de tração simples é aumentada gradativamente, as tensões internas aumentam até que, ultrapassada a tensão de resistência à tração do material, a peça se rompe.

No caso da compressão axial, pode ocorrer a perda de estabilidade da peça, bem antes que seja atingida a tensão de ruptura à compressão do material, como mostra a figura ao lado. A este fenômeno de perda de estabilidade da barra, antes da ruptura do material, dá-se o nome de flambagem.

A flambagem é o fenômeno que distingue radicalmente o comportamento de barras submetidas a tração em relação ao de barras submetidas a compressão simples, exigindo uma preocupação especial com as barras comprimidas.
A flambagem depende de diversos fatores que, bem controlados, garantem um trabalho adequado das barras submetidas a compressão.
É imediata a conclusão de que a intensidade da força aplicada é um desses fatores. Quanto maior sua intensidade maior será o perigo de flambagem da barra. O tipo de material é outro fator.

Como foi visto anteriormente, existem materiais mais deformáveis do que outros, sendo a deformabilidade de cada material medida pelo seu módulo de elasticidade, obtido no ensaio tensão x deformação.
Materiais com módulos de elasticidade altos serão menos deformáveis e, portanto, sofrerão menos riscos de flambagem.
Outros fatores, menos evidentes, podem ser observados a partir de ensaios muito simples. Se se comprimir barras, com as mesmas seções e de comprimentos diferentes, notar-se-á que elas flambarão com forças diferentes: quanto maior o comprimento da barra menor será a força necessária para provocar a flambagem. Verifica-se também que a flambagem da barra depende do quadrado do seu comprimento. Em outras palavras, se se duplicar o comprimento de uma barra, a força necessária para provocar sua flambagem ficará reduzida a apenas um quarto.
A barra ficará quatro vezes mais instável.
Por isso, tornam-se de fundamental importância as condições de travamento lateral das barras submetidas a compressão.

A forma e as dimensões da seção da barra são outros fatores de grande importância no fenômeno da flambagem. Se se usar um modelo bem simples, vê-se que, ao flambar, as seções da barra, antes paralelas, giram em torno dos seus eixos, aproximando-se numa das faces e afastando-se em outra.
Essa situação mostra que a maior ou menor possibilidade de uma barra flambar está diretamente ligada à maior ou menor facilidade de giro das suas seções.

Uma folha de papel dobrada, se comparada a uma folha não dobrada, apresenta uma resistência muito superior ao giro em relação ao eixo horizontal que passa pelo centro de gravidade de sua seção transversal.

Convém lembrar que o centro de gravidade de uma figura plana é o ponto em que, se a figura tivesse peso, poderia ser suspensa sem sofrer qualquer giro, mantendo-se horizontal. Para que isso ocorra, é intuitivo ser necessário que as massas que compõem a figura estejam adequadamente distribuídas, em todas as direções, em relação ao centro de gravidade.

Daí ser possível que o centro de gravidade de uma figura plana esteja situado fora dessa figura.

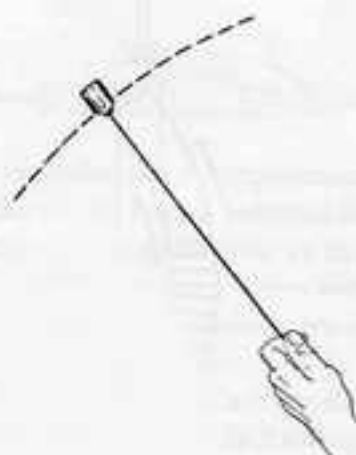
CG = centro de gravidade da seção

Logo, a folha dobrada apresenta maior resistência à flambagem do que a folha não dobrada.

Qual é, portanto, o fator que faz com que uma seção se torne mais ou menos resistente ao giro? A maior ou menor possibilidade de uma seção girar depende da maneira como o material está distribuído em relação ao centro de gravidade da seção.

Para entender melhor esse fenômeno, observe a seguinte analogia física: suponha que se queira girar, com a mão, uma massa qualquer amarrada a ela por um fio. Quanto mais afastada essa massa estiver da mão mais difícil será impulsioná-la ao giro.

Ou seja, quanto mais longe estiver a massa do centro de giro mais difícil será tirá-la da inércia.

A esse fenômeno dá-se o nome de momento de inércia.

Coisa semelhante ocorre com a distribuição de material na seção de uma barra. Quanto mais afastado estiver o material do centro de giro da seção da barra, ou seja, do seu centro de gravidade, mais difícil será girar a seção e, consequentemente, mais difícil será a barra flambar.

No exemplo, quando a folha de papel está dobrada, a sua seção transversal tem a forma de um V cujo centro de gravidade encontra-se na posição mostrada na figura da página anterior.

Quando a folha não está dobrada, a sua secção tem a forma de um retângulo cuja altura é muito pequena (a espessura da folha).

Nesta situação, o centro de gravidade encontra-se na metade dessa altura.

Pode-se ver que a distribuição de material em relação ao centro de gravidade das secções é muito diferente, para a folha dobrada e a não dobrada.

Na folha dobrada, o material está mais longe do centro de gravidade, ou centro de giro, o que resulta em maior resistência ao giro da seção e, portanto, em maior resistência à flambagem.

A forma como o material é distribuído na seção pode ser medido matematicamente e recebe o nome de momento de inércia da seção.

O momento de inércia da seção relaciona as diversas porções de áreas que a compõem com suas distâncias ao centro de gravidade da seção.

Pode-se concluir que, para barras submetidas a compressão, portanto sujeitas à flambagem, a forma da seção, ou seja, a maneira como o material está distribuído em relação ao centro de gravidade da seção, é de extrema importância.

Resumindo, a rigidez de uma barra à flambagem depende da relação entre o momento de inércia da sua seção, do comprimento da barra e da elasticidade do material que a compõe.

A fórmula apresentada a seguir, de autoria de Euler, sintetiza bem essas relações:

$$Pcr = \frac{\pi^2 . EJ}{\ell^2}$$

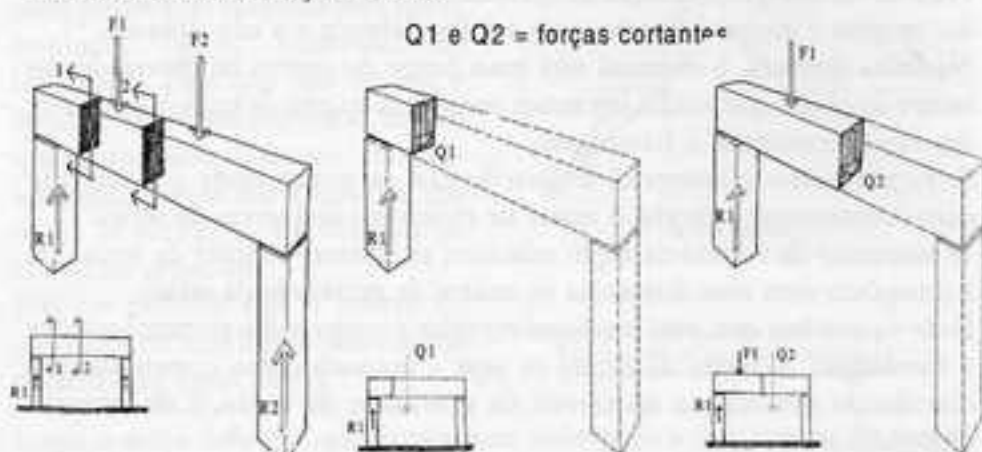
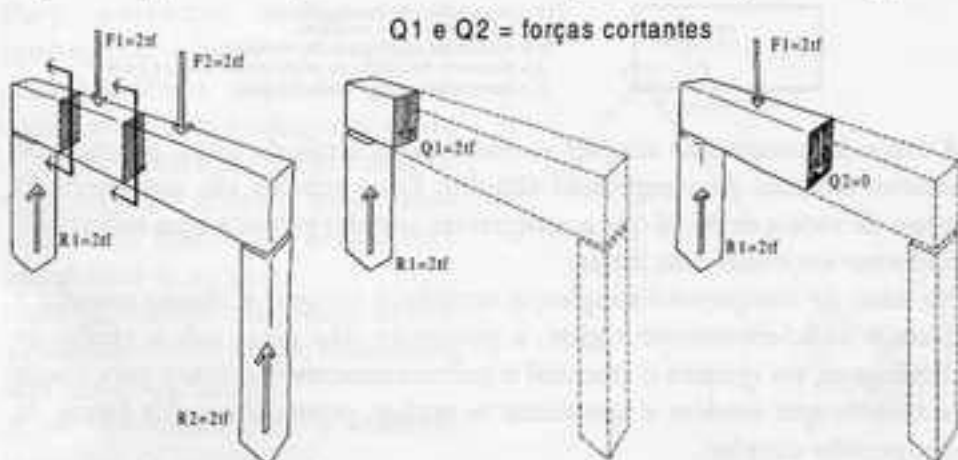
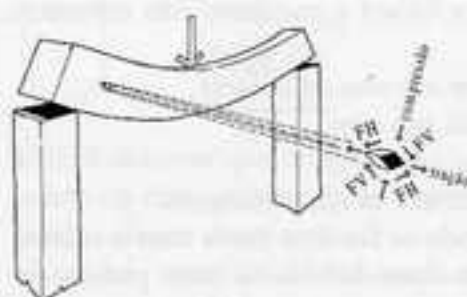
Onde:

Pcr = carga crítica de flambagem (aquela que provoca a flambagem)
E = módulo de elasticidade do material
J = momento de inércia da seção transversal da peça
ℓ = comprimento não travado da peça

A força de compressão simples se distribui na seção da barra, provocando tensões normais de compressão simples. Essas tensões são uniformes ao longo de toda a seção, já que a compressão simples provoca uma solicitação uniforme em todas suas fibras.

No caso da compressão simples, o equilíbrio interno é obtido quando a barra é suficientemente rígida, a ponto de não girar sob o efeito de flambagem, ou quando o material é suficientemente resistente para reagir às tensões que tendem a aproximar as seções, provocadas pelas forças de compressão simples.

Força cortante

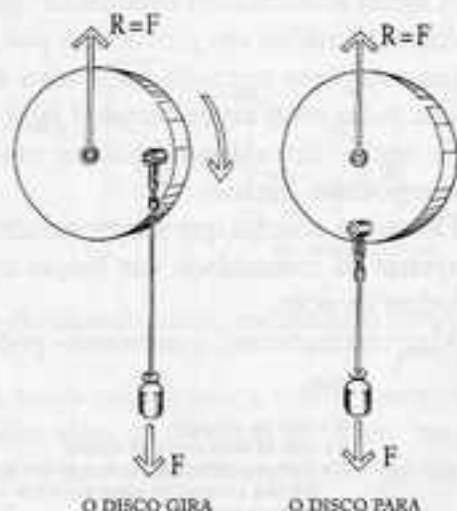
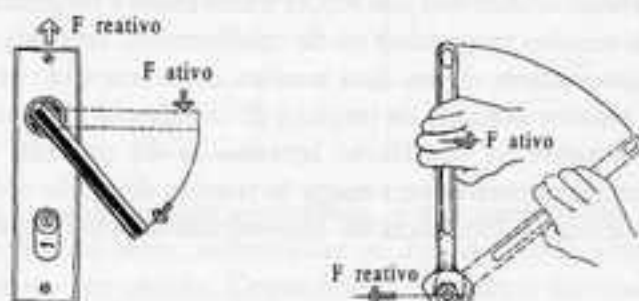
Suponha-se a viga, apresentada na figura abaixo, apoiada em seus extremos e recebendo uma força aplicada perpendicularmente ao seu eixo. Se a viga fosse cortada em qualquer posição, as duas partes cortadas perderiam o equilíbrio e girariam em relação aos apoios.
Para que o equilíbrio fosse recuperado seria necessária a aplicação de uma força vertical na seção cortada. Essa força já existe internamente à seção da viga, enquanto ela não for seccionada, e é ela que mantém o equilíbrio interno, não permitindo que as seções se desloquem na vertical. Essa força recebe o nome de força cortante.

O nome força cortante é bem apropriado, já que essas forças, ocorrendo paralelas às seções da barra, assemelham-se àquelas provocadas por uma faca quando corta um objeto. Dependendo das forças externas, a força cortante pode variar ao longo do comprimento da barra, como mostra a figura a seguir. As forças cortantes são sempre máximas junto aos apoios.

Se for usado um outro modelo, pode-se notar uma outra possibilidade de escorregamento relativo, não mais entre as fatias verticais, mas entre as fatias horizontais. Aparece uma outra modalidade de força cortante: a força cortante horizontal.

Sempre que ocorrer a possibilidade de escorregamento das seções verticais, haverá o escorregamento das seções horizontais.
São escorregamentos provocados pelas forças cortantes horizontais e verticais e que se combinam, resultando em forças inclinadas de tração e compressão.

A força cortante se distribui nas seções transversais e longitudinais da barra provocando tensões tangenciais ou de cisalhamento verticais e horizontais. O efeito concomitante dessas duas tensões, conforme visto na figura acima, resulta em tensões normais de tração e de compressão inclinadas. No caso da força cortante, o equilíbrio interno se dá quando o material é suficientemente resistente para reagir às tensões de tração e de compressão inclinadas devidas à tendência de escorregamentos horizontais e verticais das seções.

Momento - momento fletor

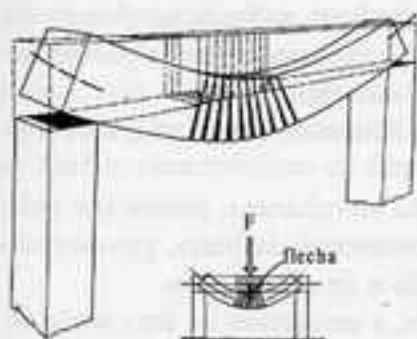
A figura mostra um disco fixado no seu centro, tendo, na extremidade de um dos seus raios, uma carga pendurada por um cabo. Se esse disco for colocado em uma posição em que o cabo que sustenta a carga não estiver alinhado com o seu centro, ele girará até que ocorra o equilíbrio, quando a carga, o cabo e o centro do disco ficarão alinhados.

O DISCO GIRA O DISCO PARA

A análise das forças que atuam no disco mostra a existência de duas forças, uma de ação, representada pelo peso, e outra de reação a esse peso, aplicada no centro do disco, onde ele está fixado.
Enquanto as linhas de ação dessas forças permanecerem não alinhadas, o disco girará.
Quando elas se alinharem, o disco terá parado.
A figura mostra como as forças encontram-se aplicadas no disco.
Conclui-se dessa experiência que o giro ocorre enquanto estiver aplicado no disco um par de forças, de mesma direção (paralelas e verticais), sentidos contrários (uma para cima e outra para baixo) e enquanto não estiverem colineares.
A um par de forças nesta situação dá-se o nome de binário.
Sempre que ocorrer um binário ocorrerá um giro.
A esse giro dá-se o nome de momento.
A aplicação de binários é muito comum em tarefas cotidianas.
Sempre que se abre uma porta, ou quando se faz uma curva com o volante do carro, ou, ainda, quando se tira o parafuso da roda do carro para trocar o pneu, são aplicados binários de forças.

A figura acima mostra os binários que ocorrem em algumas dessas situações.
Alguns binários são provocados por um par de forças ativas, outros, por um par composto por uma força ativa e outra reativa.
Em todas essas experiências, é fácil verificar que se pode provocar um giro de maior intensidade quanto mais afastadas estiverem as forças que compõem o binário.
Do que se conclui que a intensidade do giro, ou do momento, não depende apenas da intensidade das forças mas também da distância entre as suas linhas de ação.
Matematicamente, o momento pode ser expresso pela seguinte relação:

$$M = F \times D$$

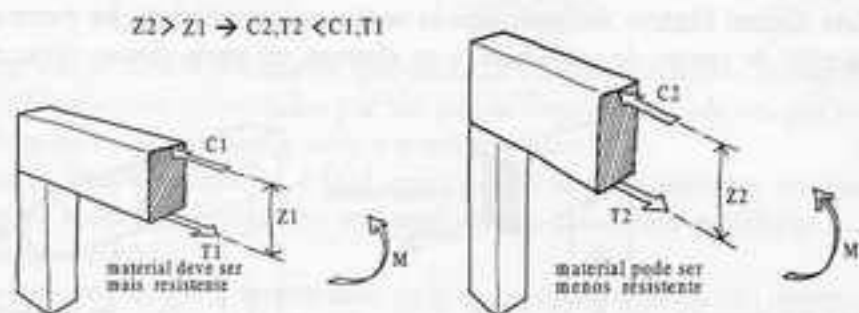
Onde:

M = valor do momento
F = valor da força devida ao binário
D = distância entre as linhas de ação das forças, também chamada de braço do binário ou braço de momento

A figura abaixo mostra uma barra sobre dois suportes, no meio da qual é aplicada uma força perpendicular ao seu eixo.

Assim solicitada, a barra deforma-se e o seu eixo, que antes era reto, passa a ter a forma de uma parábola. O modelo mostra que, ao sofrer essa deformação, todas as seções da barra, que inicialmente eram paralelas, giram em relação aos eixos horizontais que passam pelos seus centros de gravidade.

É fácil observar que, ao girar, as seções se aproximam, na porção localizada acima do eixo que passa pelo centro de gravidade da seção, e se afastam, na porção abaixo desse eixo.
O modelo mostra também que a intensidade desse giro varia ao longo do comprimento da barra.
As seções próximas ao centro giram mais que aquelas próximas aos apoios.
Para que as seções girem é necessária a ocorrência de um par de forças (binário ou momento).
Esse binário é facilmente visualizado no modelo: basta que se considerem as reações de apoio e as forças verticais em cada seção, as forças cortantes.
Esse binário externo ativo devido à reação R e à força cortante Q provoca um binário interno reativo que resulta nas forças de compressão C e de tração T.
Este último binário faz com que as seções se aproximem, na parte acima do eixo do centro de gravidade, e se afastem, na parte abaixo desse eixo.

As deformações que ocorrem ao longo do eixo da barra, tornando-o curvo, são denominadas flechas.
Portanto, o momento que ocorre na barra submetida a carregamentos aplicados perpendicularmente ao seu eixo, além de provocar giros nas suas seções, também provoca flecha no seu eixo, tratando-se, então, de um momento de flecha ou momento fletor.

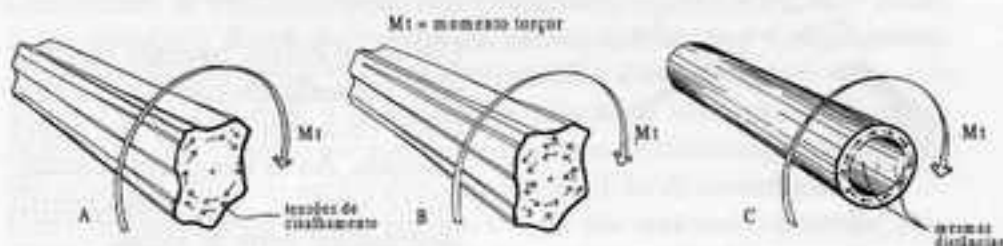
O momento fletor provoca deformações parecidas com as causadas pela flambagem, ou seja, flechas e giros das seções.
Mas os agentes causadores são diferentes.
Enquanto a flambagem é provocada por uma força aplicada na direção do eixo da barra (força de compressão simples), o momento fletor é provocado por forças aplicadas perpendicularmente a esse eixo.
Os dois fenômenos apresentam-se visualmente idênticos, mas são conceitualmente bem diferentes.
O binário interno de tração e compressão simultâneas, provocado pelo momento fletor, se distribui na secção transversal da barra, provocando simultaneamente tensões normais de tração e de compressão.
À semelhança do fenômeno da flambagem, a resistência de uma seção ao momento fletor depende do seu momento de inércia, ou seja, da maior ou menor possibilidade de giro das seções. Entretanto, duas seções de formas diferentes, mas com os mesmos momentos de inércia (o que é sempre possível ocorrer), podem ter resistências diferentes à flexão.
O momento de inércia da seção não é suficiente, isoladamente, para medir a sua resistência. Entre duas seções de mesma inércia, será mais resistente a que tiver menor altura, o que pode contrariar a intuição.
Logo, o fator que mede a resistência de uma seção submetida à flexão, é dado pela relação entre o seu momento de inércia e a distribuição de material em relação à altura da seção, denominado módulo de resistência.
Entre duas seções de mesma largura, a mais alta será mais resistente, pois apresenta maior módulo de resistência. Entre duas seções de mesma largura, a mais alta será mais resistente, pois apresenta maior módulo de resistência.

No caso do momento fletor, o equilíbrio interno se dá quando o material é suficientemente resistente para absorver o binário interno de tração-compressão que ocorre na seção, ou quando o material, não tendo tal resistência, exige que o braço do binário seja suficientemente grande para que as forças do binário tenham um valor menor, compatível com a resistência desse material. As figuras acima mostram as duas maneiras de se obter o equilíbrio interno à flexão.

Momento torçor

Como foi visto anteriormente, momento significa giro, portanto momento torçor deve, também, significar um tipo de giro.
De fato, quando ocorre momento torçor numa barra ocorre giro das suas seções, mas, diferentemente do momento fletor, no caso do momento torçor as seções giram, com o eixo da barra mantendo-se reto, não apresentando as flechas características da flexão.

Um outro ensaio, bastante simples, pode ser realizado com um canudo, feito com uma folha de papel enrolada. Ao se torcer esse canudo, notar-se-á o escorregamento longitudinal entre as folhas.

Deste ensaio, conclui-se que a torção provoca, além do giro relativo entre as seções transversais, um escorregamento longitudinal das seções horizontais.
Conclui-se, ainda, que o giro transversal e o escorregamento longitudinal provocam forças cortantes transversais e longitudinais, semelhantes àquelas discutidas anteriormente, quando foi apresentada a força cortante. Esses dois efeitos - força cortante transversal e força cortante longitudinal - ocorrem simultaneamente, dando como resultado o aparecimento de forças de tração e de compressão, inclinadas a 45 graus.
O efeito dessas forças fica bastante evidente no modelo a seguir, que apresenta uma barra quadriculada.
As deformações que sofrem as quadrículas mostram as direções das forças resultantes da torção. As forças cortantes transversais e longitudinais devidas à torção distribuem-se nas seções das barras, provocando tensões de cisalhamento transversais e longitudinais.
O efeito simultâneo dessas tensões resulta em tensões normais inclinadas de tração e de compressão.

Os binários de forças formados pelas resultantes das tensões de cisalhamento na seção é que equilibram o momento torçor. Logo, quanto mais afastadas do centro de gravidade estiverem essas resultantes menos solicitada será a seção, daí serem mais eficientes as seções que apresentem material longe do centro de gravidade e igualmente afastado em todas as direções. Desse modo as seções de tubos circulares são as mais eficientes para absorver torção. Quando estas não forem possíveis, deverão ser previstas seções que se aproximem da forma circular vazada.

No caso da torção, o equilíbrio interno se dá, à semelhança do caso da força cortante, quando o material tiver resistência suficiente para reagir às tensões de tração e de compressão resultantes da tendência de escorregamento transversal e longitudinal das seções.

Observações importantes sobre os esforços

Viu-se, até aqui, que a aplicação de forças externas a um elemento estrutural (carregamentos e reações dos vínculos) provoca a ocorrência de forças internas.
As primeiras são denominadas esforços externos ativos e reativos.
As forças internas provocam tensões, também internas,
Neste caso, as primeiras são denominadas esforços internos ativos e as segundas, esforços internos reativos.
A interação entre os esforços internos ativos e os esforços internos reativos é que vai resultar no equilíbrio ou desequilíbrio interno das seções; em outras palavras, na sua resistência ou não.

Os esforços internos foram divididos, no estudo aqui apresentado, em cinco tipos: tração simples, compressão simples, força cortante, momento fletor e momento torçor.
Foi visto que esses esforços resultam em tensões normais e tangenciais. Na realidade, são essas tensões que, em última análise, interessam.
É por meio da comparação dessas tensões com aquelas a que os materiais estruturais são submetidos que se pode dizer se as dimensões das seções de um elemento estrutural são ou não suficientes para suportar cargas e vencer vãos.
A divisão do estudo dos esforços em cinco tipos é uma maneira de tornar o estudo das tensões mais inteligível, tanto do ponto de vista didático como no que se refere ao próprio cálculo das estruturas.

A relação entre os esforços atuantes e as seções resistentes: O princípio da distribuição das massas na seção

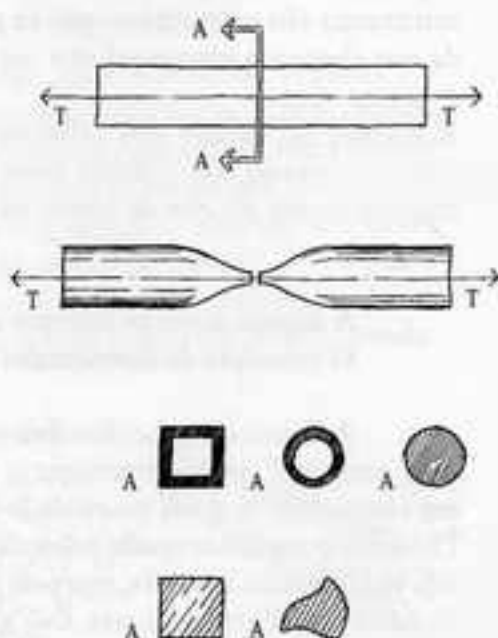
A forma como se distribui o material na seção transversal de uma peça estrutural pode determinar o seu melhor ou pior aproveitamento e, em conseqüência, a sua quantidade e o espaço ocupado.
Diminuir o espaço ocupado pelos elementos estruturais pode ser desejável, seja por questões estéticas, seja pela necessidade de aumento do espaço útil da edificação.Entretanto, não é só a economia de material que define uma boa escolha. A maior ou menor facilidade de execução da forma de uma seção, em algumas situações, pode ser o fator determinante, impondo muitas vezes a escolha de uma forma que não seja, em princípio, a de menor consumo de material.
Discutir-se-á aqui o que se denomina "Princípio da Distribuição das Massas na Seção". Este princípio discute as relações entre os esforços atuantes e as formas de seções mais adequadas para suportá-los.

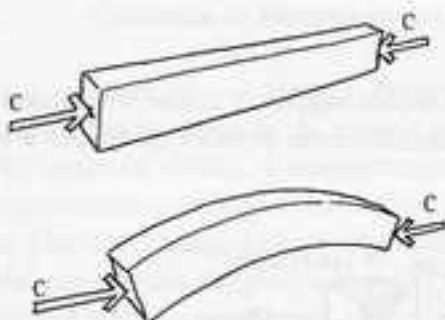
Tração simples ou axial

A tração simples ou axial, como já foi visto, desenvolve tensões uniformes na seção de uma barra.
Qualquer que seja a forma da seção, a ruptura da peça sempre se dará quando é atingido o limite de resistência do material.
Conclui-se que a quantidade de material, e não a forma como ele é distribuído na seção, é o fator determinante na resistência de uma barra submetida a tração simples ou axial.

Na figura a seguir, vê-se uma barra e diversas possibilidades de formas de sua seção transversal, todas com a mesma área A, ou seja, com a mesma quantidade de material.
Supondo que essa barra esteja sujeita a tração axial e que seja sempre usado o mesmo material, sua ruptura dar-se-á, sempre, com a mesma força de tração axial.

Se interessar, como resultado, o menor espaço ocupado pelos elementos estruturais, pode-se escolher, dentre todas as possíveis seções, aquela que concentre material bem próximo do seu centro de gravidade.
Esta seção é a circular cheia.
Devido a essa propriedade - de os esforços de tração serem bem absorvidos por seções com massa concentrada - pode-se concluir que os elementos estruturais submetidos a tração simples serão os que ocuparão menor espaço no ambiente e que resultarão mais leves física e visualmente.

Em última análise, seções com materiais próximos ao centro de gravidade são indicadas para esforços de tração simples.
Na prática, as seções que respondem bem aos esforços de tração são mostradas na figura ao lado.

Compressão simples ou axial

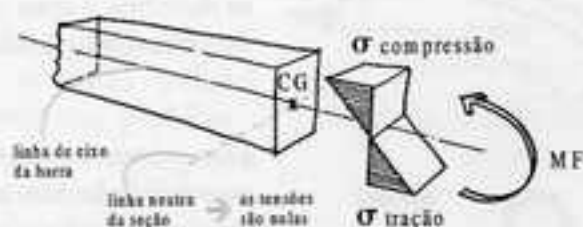
A compressão simples, como a tração simples, solicita as seções das peças estruturais com tensões uniformes.
Essas tensões crescem com o aumento do esforço de compressão, mas, ao contrário da tração simples, antes de ocorrer a ruptura da seção por compressão é bem provável que ocorra um deslocamento lateral da peça estrutural, fazendo-a perder a estabilidade.

É o fenômeno da flambagem, já discutido.
Viu-se que para aumentar a resistência da seção sob o efeito da flambagem é preciso que o material se distribua o mais afastado possível do centro de gravidade da seção.

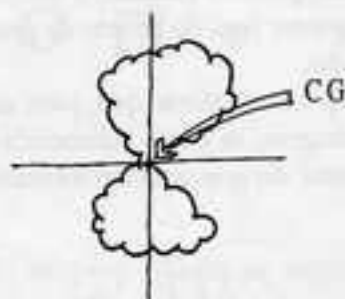
Isso leva a uma série de possibilidades de seções, como as mostradas na figura ao lado.
Em uma seção submetida a compressão simples, o material junto ao seu centro de gravidade apresenta pouca eficiência, podendo ser desprezado.

Portanto, ao se procurar maior economia de material, deve-se escolher seções que não apresentem material junto ao centro de gravidade, ou seja, as seções vazadas. Se, além disso, também interessar aquela que ocupa o menor espaço, optar-se-á pela seção vazada circular, que ocupa espaço 10 % menor. Como na seção circular vazada o material distribui-se uniformemente em torno do centro de gravidade, é ela a única que apresenta a mesma resistência à flambagem, em qualquer direção.
Ao contrário da tração simples, na compressão simples não é a quantidade de material o fator determinante da resistência da seção, mas a maneira como esse material se distribui.
Na compressão simples, a melhor distribuição de massa na seção é aquela que ocorre fora do centro de gravidade e igualmente espaçada em qualquer direção.
É importante notar que, para uma mesma força, devido ao fenômeno da flambagem, as peças submetidas a compressão simples serão sempre mais robustas do que aquelas submetidas a tração simples.

Tanto física como visualmente, as primeiras serão sempre mais pesadas do que as segundas.
Na prática, as seções que respondem bem ao esforço de compressão simples são mostradas na figura ao lado.

Momento fletor - flexão

A distribuição das tensões nas seções sujeitas a momento fletor é a vista na figura abaixo. Ocorrem simultaneamente tensões de tração e de compressão.

A intensidade dessas tensões depende não só da altura da seção, o que corresponde a uma variação no braço do binário tração-compressão, ou seja, a uma variação na intensidade dessas forças, como também do momento de inércia da seção, ou seja, da maior ou menor tendência de giro da seção. A relação entre o momento de inércia da secção e a sua altura é denominada módulo de resistência da seção.
Em outras palavras: quanto maior o módulo de resistência de uma seção menores serão as tensões devidas ao momento fletor e, portanto, mais resistente será a seção.
As tensões devidas ao momento fletor não se distribuem de maneira uniforme; variam ao longo da altura da seção, de um máximo à compressão a um máximo à tração, passando por zero junto ao centro de gravidade da seção.

Essa distribuição leva a concluir que, em uma seção submetida a momento fletor, as massas devem-se concentrar em pontos mais afastados do centro de gravidade e diminuir nas suas proximidades.
Um esquema representativo dessa distribuição de massa é dado pela figura ao lado.

Na prática, as seções que respondem bem aos esforços de flexão são mostradas ao lado.

Conceito de hierarquia dos esforços

Note-se que tanto o fenômeno da flambagem como o de flexão exige uma distribuição de massas longe do centro de gravidade da seção.
No caso da flexão, a concentração de material deve ocorrer onde se concentram os esforços de tração e compreessão, ou seja, transversalmente ao plano em que ocorre o momento fletor.
Na compressão simples, a impossibildade de se prever em que direção vai ocorrer a flambagem exige a necessidade de uma distribuição uniforme de material em todas as direções.
O fenômeno da flambagem exige da seção mais rigidez (distribuição adequada de material) do que quantidade de material.
Duas barras de mesmo comprimento, mesma seção, mesmo módulo de elasticidade e de resistências diferentes, flambarão com a mesma carga crítica. Já a flexão exige, além da rigidez, a resistência do material, o que implica maior quantidade de material ou sua maior resistência.
As fórmulas a seguir, que dão os esforços críticos para compressão simples e o momento fletor respectivamente, comprovam essa afirmação.
As fórmulas apresentadas referem-se a barras com extremidades articuladas.

Pcr = carga que inicia a flambagem da barra
E = módulo de elasticidade do material
J = momento de inércia da seção da barra
L = comprimento não travado da barra

$$Pcr = \frac{\pi^2 \times EJ}{L^2}$$

Mcr = momento que inicia a ruptura da barra
σ = tensão de ruptura do material
W= módulo de resistência da seção

$$Mcr = \sigma \times W$$

A primeira fórmula evidencia que a capacidade de uma barra ser estável à flambagem independe da resistência do material, pois ela é independente de σ (tensão de resistência do material), o que já não ocorre com a capacidade de uma seção sob flexão, como mostrado na segunda fórmula.
Conclui-se daí que a flexão exige, além de uma distribuição adequada, maior quantidade e melhor qualidade de material.
Vê-se, portanto, que conforme o esforço aplicado há uma exigência diferente em relação à quantidade, à forma de distribuição e à qualidade de material.
Alguns esforços exigem menos, outros mais.
O que resulta numa hierarquia de esforços, ou seja, existem esforços mais econômicos do que outros quanto ao consumo de material e ao espaço ocupado pelas seções.

Os esforços de tração simples, como se pode ver, são aqueles que exigem a menor quantidade de material e resultam em seções mais esbeltas e leves, tanto física como visualmente.

Já o esforço de compressão simples, por exigir certa rigidez, conduz a seções com maior consumo de material e mais robustas do que as submetidas a tração simples, enfim, a peças estruturais mais pesadas, tanto física como visualmente.

compressão e tração

compressão e tração

Por último, tem-se a flexão, que exige seções com uma distribuição adequada de material e, ainda, que esse material tenha grande resistência e seja em quantidade considerável.

flexão

Resumindo, pode-se dizer que, em termos de dimensões das secções transversais das peças estruturais, os esforços de tração simples são os que apresentam desempenho mais favorável e os de flexão, menos favorável, ficando a compressão simples no meio-termo.
Os exemplos anteriormente apresentados mostram como os sistemas estruturais submetidos a tração simples, como um tirante , são mais esbeltos do que aqueles submetidos a compressão simples, como um pilar do mesmo material. Mostram também sistemas estruturais que vencem vãos, como as pontes, deixando claro que aqueles em que predominam esforços de tração e de compressão simples são mais leves visualmente do que aqueles em que o momento fletor é predominante. Se a intenção fosse procurar soluções estruturais objetivando apenas a economia de material e o menor peso físico e visual, dever-se-ia procurar fazer com que essas estruturas fossem solicitadas exclusivamente por esforços de tração simples, o que é totalmente impossível.

Qualquer estrutura solicitada exclusivamente por esforço de tração simples, como uma tenda, por exemplo, exigirá sempre um ponto de apoio, no qual ocorrerão outros esforços.
Pensar em estruturas que não sejam solicitadas predominantemente pelo esforço de flexão é uma maneira de criar estruturas mais econômicas, do ponto de vista de consumo de materiais.
Essas estruturas são possíveis e muito comuns.
É o caso dos cabos, arcos, treliças planas e espaciais, entre outras, nas quais predominam os esforços de tração e/ou compressão simples, sendo evitados os esforços de flexão.
O comportamento dessas estruturas será apresentado mais adiante.

Relação entre os materiais e os esforços atuantes

Os materiais têm características próprias, dadas pela sua composição molecular. Alguns materiais, como o concreto armado, apresentam grande resistência à compressão e baixa resistência à tração.
Outros, como o aço, apresentam resistências iguais quando comprimidos ou tracionados. As propriedades físicas dos materiais podem variar conforme a direção em que sejam analisadas ou, em casos mais drásticos, de ponto para ponto.São denominados isótropos os materiais que apresentam propriedades iguais em todas as direções,
Os materiais que apresentam propriedades iguais em duas direções e diferentes em uma terceira são denominados ortótropos.
Os que apresentam propriedades diferentes em todas as direções são denominados anisótropos.
Os materiais que apresentam propriedades iguais em todos os pontos são denominados homogêneos; os demais, heterogêneos.
O melhor material será o que, além de isótropo, for também homogêneo, pois terá comportamento idêntico em todos os pontos e em todas as direções.
Um material isótropo e homogêneo, como o aço, não exige uma preocupação quanto à direção em que é solicitado por uma força; o mesmo já não ocorre com a madeira que, por ser um material natural e formado por fibras, apresenta uma direção mais resistente do que outra.
A madeira exige atenção quanto à direção em que é solicitada.
Convém que os materiais estruturais, além de ter resistência suficiente para suportar os esforços aos quais estão submetidos, sejam dúcteis, ou seja, capazes de deformar consideravelmente e de forma visível antes de atingir seu limite de resistência, denunciando, desta forma, problemas que possam estar ocorrendo na estrutura.

Conhecer bem o material com o qual vamos trabalhar permite que se tire o melhor proveito de suas características e que se evite usá-lo de maneira inadequada, não só pondo em risco a estrutura projetada como tornando-a antieconômica.
Algumas propriedades devem ser bem conhecidas para que a aplicação do material nas estruturas seja feita da maneira mais adequada, tanto técnica quanto economicamente.
As propriedades mais importantes , do ponto de vista estrutural, são:

a. Tensões de ruptura ou admissíveis de tração e de compressão simples, de flexão e de cisalhamento;
b. Módulo de elasticidade;
c. Coeficiente de dilatação térmica.

A tensão de ruptura indica o limite máximo de utilização do material.
A tensão admissível indica o limite seguro de uso do material.
Muitos materiais podem ter tensões altas de ruptura, como a madeira, mas podem ser pouco confiáveis, por serem resultado de um processo natural, sujeito a muitas influências negativas, o que faz com que seus limites de segurança caiam bastante.
Outros materiais, como o aço, por serem obtidos industrialmente, sob controle rigoroso, são bastante confiáveis, tendo seus limites de segurança mais próximos dos limites máximos.
O índice que qualifica a segurança de um material é o coeficiente de segurança, obtido estatisticamente em função das condições mais ou menos favoráveis de obtenção e aplicação do material.
O módulo de elasticidade mostra como se deforma o material quando sujeito a esforços, se é muito ou pouco deformável; mostra, ainda, como os materiais se deformam quando associados e como distribuí-los na seção de modo que trabalhem como se fossem um terceiro e único material.
O conhecimento do coeficiente de dilatação térmica permite a associação de materiais de forma que não ocorram esforços imprevistos causados por diferentes valores de deformação, o que pode provocar ruptura do mais fraco.
Deve-se, ainda, conhecer como os materiais se deformam ao longo do tempo.
A deformação que ocorre logo em seguida à aplicação da carga, denominada deformação imediata, é de grande importância, mas geralmente muito menor do que aquela que ocorre ao longo da vida do material, denominada deformação lenta, e que pode provocar efeitos indesejáveis após algum tempo de utilização da estrutura.

Comentou-se anteriormente que alguns materiais apresentam resistências diferentes quando solicitados por diferentes esforços.
Quando um material resiste bem a um determinado esforço e mal a outro, podemos compensar esse defeito associando-o a outro material que resista bem a este último.
Usamos os materiais de forma associada quando um deles, por si só, não for capaz de absorver, da melhor maneira, certos esforços ou quando a associação mostra-se mais interessante do que o trabalho dos materiais isoladamente.
Por exemplo, o concreto armado, em que o aço supre, com sua grande resistência à tração, a baixa resistência do concreto simples a esse esforço.
A associação dos materiais, quando adequadamente resolvida, conduz a soluções extremamente interessantes, seja no aspecto econômico, seja no estético.
Mais à frente haverá oportunidade de discutir soluções de associação de materiais.
O resultado sinergético da associação de materiais é uma fonte de pesquisa pouco explorada, com quase tudo ainda por ser feito.
A escolha de um ou mais materiais para a composição de uma estrutura é feita basicamente em função de dois fatores: o econômico e o estético.
O fator econômico leva em consideração, além da quantidade de material e da mão-de-obra envolvidos, o tempo gasto para a execução da obra.
A quantidade de material depende de como responde aos esforços que o solicitam e da sua distribuição na seção em decorrência desses esforços.
A quantidade de mão-de-obra e o tempo de execução dependem do peso de material envolvido, dos detalhes de execução, ou seja, da forma de manuseio desse material.
Um índice bem indicativo do melhor ou pior desempenho do material quanto à economia é o índice de eficiência, dado pela seguinte relação :

$$K = \frac{\sigma}{\gamma}$$

Onde:

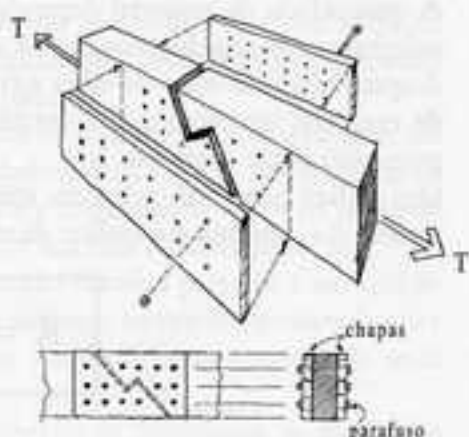
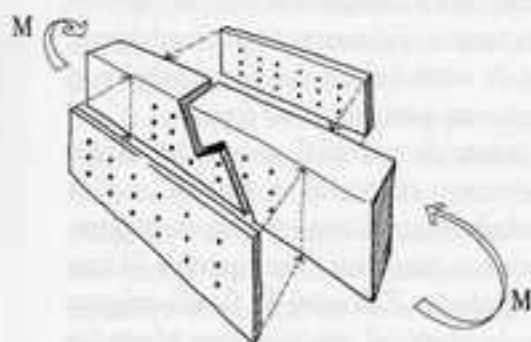
K : Índice de eficiência;
σ : Tensão de resistência do material;
γ : Peso específico do material.

Quanto maior o valor de k, ou seja, quanto mais resistir o material, com o menor peso, mais eficiente será a sua utilização.

Madeira

As propriedades da madeira são decorrentes do tipo biológico da árvore que lhe deu origem, porém estas propriedades estão sujeitas a alterações, pois, sendo a madeira um material natural, está sujeita, na sua formação e obtenção, aos fatores climáticos, que podem ser muito variáveis ao longo da vida da árvore.
As árvores se dividem em dois grandes grupos: as frondosas e as coníferas. As primeiras fornecem madeiras mais duras, portanto mais resistentes aos esforços e aos ataques de agentes deterioradores.
A madeira é formada por fibras que se desenvolvem segundo uma direção predominante, resultando num material anisótropo e pouco homogêneo. Por isso, as suas características físicas são bastante diferentes, conforme a direção e o ponto em que se analise o seu comportamento.
Além disso, devido a fatores imponderáveis, já aludidos, os coeficientes de segurança adotados são bastante elevados, podendo chegar a 9, ou seja, trabalha-se com tensões da ordem de 1/9 das que romperiam o material, o que impõe a necessidade de usar mais material do que seria necessário se o grau de confiança fosse maior.
Os esforços de tração simples são bem absorvidos quando atuam na direção das fibras, ocorrendo o contrário quando atuam na direção normal às mesmas, podendo ser consideradas desprezíveis as resistências nesta direção.

As peças estruturais de madeira apresentam grande dificuldade de transmissão dos esforços de tração simples, nos pontos de descontinuidade, ou seja, em emendas e nas ligações entre barras e apoios.
Essas ligações dificilmente são feitas sem o uso de elementos secundários, como chapas, pinos e parafusos, que podem ser de madeira ou metálicos.

Para evitar a flexão dos parafusos, o que provoca deslocamentos que diminuem a eficiência dessas ligações, é sempre recomendável, quando possível, o uso de peças pouco espessas.

Apesar da boa resistência à tração, as condições de ligações limitam o uso da madeira para grandes esforços de tração simples.
Os esforços de compressão simples são bem absorvidos quando atuam na direção das fibras da madeira.
Na direção perpendicular às fibras, a resistência da madeira é cerca de 1/5 da que apresenta na direção paralela às suas fibras.
Donde se depreende que a madeira exige uma definição correta da disposição da peça estrutural em relação às sua fibras.
Quanto a emendas e ligações e às demais partes da estrutura, a madeira, quando submetida a compressão simples, apresenta bastante facilidade de execução desses detalhes, que podem ser feitos por simples encaixes, dispensando o uso de outros complementos, como chapas, pinos e parafusos.

A madeira apresenta um bom desempenho quando solicitada à flexão; entretanto, as emendas e ligações, quando sujeitas a esse esforço, serão bastante complexas e trabalhosas. Sempre que possível, deverão ser evitadas as ligações em que ocorram esses esforços: emendas nos vãos de peças fletidas e engastamento nos vínculos.

Pode-se concluir que a madeira é um material que tem melhor desempenho quando solicitado por esforço de compressão simples, seja pela sua resistência a este esforço, seja pela facilidade de execução de vínculos.
Quanto aos esforços de tração simples e de flexão, a madeira, apesar de resistir bem a eles, apresenta pior desempenho devido às dificuldades de solução dos vínculos.

O aço

O aço é uma liga obtida industrialmente sob rígido controle. Portanto, as características de cada tipo de liga são bastante confiáveis.
Em vista disso, os coeficientes de segurança podem ser bem baixos, o que implica o uso de uma quantidade de material muito próxima daquela exigida pelos esforços máximos. O aço, nos limites de aplicação prática, é uma material isótropo e homogêneo, o que facilita seu uso, independente da direção de aplicação do esforço.

Do ponto de vista de aplicação em estrutura, o aço apresenta a interessante característica de ter a mesma resistência à tração e à compressão.
O esforço de tração simples é o que melhor se adapta ao aço, já que, além de produzir secções esbeltas, não apresenta nenhuma dificuldade nos vínculos, seja em emendas ou em ligações com outras partes da estrutura. Pode-se afirmar que o aço é o material que melhor se adapta a este tipo de esforço. Quanto maior a resistência do aço mais indicado é o seu uso para esforços de tração simples. É muito comum o uso do aço de alta resistência nas estruturas em que predominam os esforços de tração simples.
Apesar do aço apresentar resistência à compressão simples tão elevada quanto à tração simples, e de não apresentar nenhuma dificuldade na transmissão desses esforços nos vínculos, a esbeltez das seções, resultante dessa vantagem, pode propiciar a ocorrência do fenômeno da flambagem. As dimensões das seções das peças submetidas a compressão simples devem ser aumentadas, para que trabalhem com tensões inferiores às de flambagem. Outra forma de melhorar as condições de estabilidade das peças esbeltas é a criação de travamentos que diminuam seu comprimento livre.
Esses artifícios resultam em consumo maior de material, tornando muitas vezes desvantajosa a escolha do aço como material; o uso de seções adequadas, como as tubulares, pode reduzir ao mínimo essa desvantagem. Quando submetido a flexão, o aço apresenta um bom desempenho, já que tem resistências iguais à tração e à compressão. Esforços de flexão exigem secções que apresentem concentração de material em posições afastadas do centro de gravidade. No aço, essa exigência é facilmente atendida com o uso de seções em I, cuja execução é muito mais simples do que em qualquer outro material. Quanto à transmissão desse esforço nas ligações e nas emendas, o aço não apresenta nenhuma dificuldade, pois pode-se recorrer à soldagem, que permite soluções extremamente simples.
Pode-se concluir que o aço é um material que aceita muito bem os esforços de tração simples e de flexão, sendo obviamente melhor no primeiro.
O problema da flambagem, em conseqüência da esbeltez das peças estruturais, diminui a vantagem do uso do aço nas peças submetidas a esforços de compressão simples.

O concreto armado

O concreto é um material resultante da mistura de outros materiais. Apesar disso, dentro de certos limites, pode ser considerado como isótropo e homogêneo, pois as suas propriedades físicas são as mesmas em todas as direções.

Entretanto, ao contrário da madeira e do aço, as suas resistências à tração e à compressão são muito diferentes, sendo aquela da ordem de um décimo desta. Por isso, para torná-lo um material mais versátil, criou-se a sua associação ao aço, que tem resistência à tração muito elevada, originando-se um terceiro material com boas características de absorção tanto de esforços de tração como de compressão.

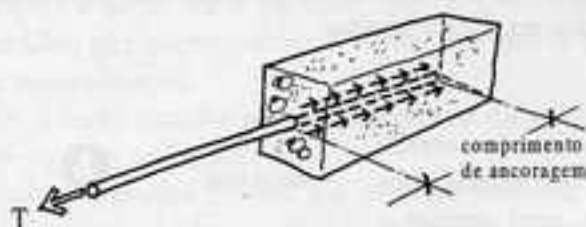
Sendo o concreto armado um material composto de vários outros, como cimento, areia, pedra, água e barras de aço, apesar de ter um controle bastante rígido na sua execução, não apresenta características tão precisas como as do aço, mas também não tão imprecisas como as da madeira, o que permite trabalhar com coeficientes de segurança não muito elevados.

Neste aspecto, o concreto armado pode ser considerado um material confiável.

A resistência do concreto armado à tração simples é dada apenas pela armação, já que o concreto sozinho apresenta uma resistência quase desprezível a esse esforço.

Nesta situação, o concreto tem apenas a função de proteger a armadura. Além disso, quando o aço da armação é muito solicitado, podem ocorrer fissuras com aberturas muito grandes, obrigando a diminuir as tensões de trabalho, como forma de controlar a abertura dessas fissuras.

Isso se faz com o aumento das seções de concreto e de aço, resultando no aumento do consumo de materiais.

As emendas e vínculos são facilmente exeqüíveis quando o concreto armado é solicitado por tração simples, pois a transmissão dos esforços nessas ligações se dá pelo adequado comprimento de ancoragem das armações.

O comprimento de ancoragem é o comprimento necessário de armação a ser envolvido pelo concreto para transmitir adequadamente as forças de tração ou de compressão nas emendas e ligações de peças de concreto armado.

Devido à boa resistência do concreto e do aço à compressão, o concreto armado responde de maneira perfeita a esforços de compressão simples.

O problema de flambagem das peças é reduzido ao mínimo, já que as seções de concreto armado são muito robustas.

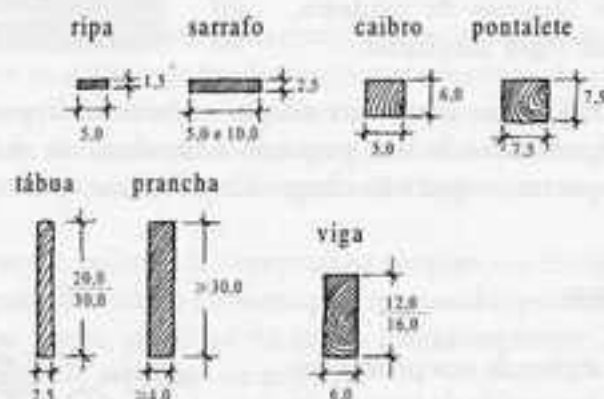
Não há qualquer dificuldade na transmissão desse esforço nos vínculos, que geralmente são monolíticos.
Os esforços de flexão são bem absorvidos pelo concreto armado, já que ele apresenta boa resistência à tração e à compressão.
A obtenção de seções econômicas, como a seção I, é trabalhosa, devido às fôrmas, resultando no uso de secções menos eficientes, como a retangular.
Pode-se concluir que o concreto armado é um material que não apresenta vantagens de uso quando predominam esforços de tração simples, sendo bastante vantajoso quando solicitado a esforços de compressão simples e a momento fletor, principalmente os primeiros.

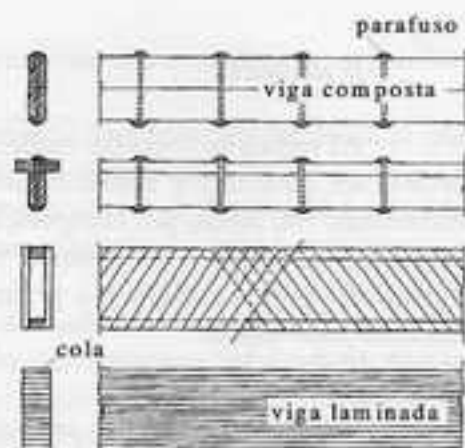
Relação entre os materiais e as seções

Foi visto anteriormente que para cada tipo de esforço existe uma distribuição mais adequada de material na seção da peça estrutural, e que seções submetidas a esforço de tração simples podem ter sua massa concentrada próximo ao seu centro.
Quando submetidas a esforço de compressão simples, as seções, para trabalhar melhor, devem ter suas massas igualmente afastadas do centro de gravidade da seção.
Quando sujeitas a flexão, devem ter suas massas concentradas longe do eixo do centro de gravidade contido no plano ortogonal ao de ocorrência desse esforço.
Os esquemas de distribuição de material na seção em função do tipo de esforço são mostrados na figura abaixo.

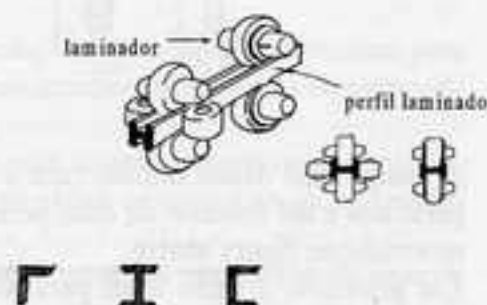
Apesar de algumas seções serem mais vantajosas do que outras para um tipo de esforço, nem sempre o serão para um determinado material, em razão das dificuldades de sua execução.
É esse aspecto, da maior ou menor facilidade e, às vezes, até da impossibilidade de se executar determinada seção com certo material, que será discutido nos próximos itens.

A madeira

As seções de peças de madeira podem ser as naturais (o tronco) ou podem ser obtidas por beneficiamento do tronco em serrarias (secções comerciais) ou, ainda, por composição de diversas dessas seções.
As secções comerciais são bastante variadas - a ripa, o sarrafo, o caibro, o pontalete, a viga, a tábua e a prancha – vendo-se, na figura ao lado, as medidas mais usuais.

A composição dessas bitolas, com o uso de pinos de madeira e de aço, de parafusos e até mesmo de cola, permite obter outra série de seções, como mostrado na figura abaixo.
Em princípio, a seção ideal para ser utilizada em estruturas de madeira seria a circular, por corresponder à forma em que o tronco de árvore se apresenta naturalmente.
Entretanto, a seção circular apresenta algumas dificuldades com vínculos e com elementos de vedações.
No mercado, as seções brutas, ou seja, os troncos, são difíceis de ser encontradas, prevalecendo as seções beneficiadas, retangulares e quadradas.
Para os esforços de tração simples, a madeira permite seções facilmente encontradas, podendo ser utilizadas seções brutas ou beneficiadas industrialmente.
Para os esforços de compressão simples, a seção ideal - a circular vazada - é quase impossível de ser feita com madeira, à exceção dos troncos de bambu; entretanto, seções próximas à ideal, como as circulares e as quadradas cheias, são muito fáceis de ser obtidas.
Para esses esforços, os vínculos são facilmente elaborados, já que podem ser resolvidos por simples encaixe ou por contato direto de superfícies.

A seção ideal para momento fletor, a I, pode ser feita de madeira, por composição de peças.
A seção retangular de madeira, que não é a ideal mas responde bem a esse esforço, é facilmente encontrada.
Para grandes dimensões, podemos usar seções retangulares obtidas por colagem de lâminas de madeira, denominadas vigas laminadas.

Pode-se concluir que a madeira adapta-se bem às diversas necessidades de seção, apresentando um pequeno acréscimo de mão-de-obra nas seções compostas, o que não chega a inviabilizar o seu uso.

O aço

As seções de aço podem ser obtidas por laminação de tarugos de aço, pelo dobramento e/ou soldagem de chapas. Essas possibilidades permitem dispor das mais variadas formas de seção de aço por meio de procedimentos bastante simples e corriqueiros.

As seções ideais para esforços de tração axial são facilmente obtidas com o aço; são elas fios ou conjunto de fios: os cabos.
Qualquer seção industrializada, quer por meio de laminação, de dobramento ou de soldagem de chapas, serve para absorver esse tipo de esforço, ficando a escolha subordinada a fatores estéticos e de ordem econômica. As seções para esforços de compressão simples, desde a ideal-o tubo circular- até o perfil H, são facilmente obtidas com aço.
A seção ideal para momento fletor, a I, é bastante corriqueira, seja laminada ou de chapas soldadas.
Seções tubulares, que também são muito interessantes para este tipo de esforço, podem ser obtidas sem dificuldades.
Conclui-se que se pode executar, com bastante facilidade, as mais variadas e complexas formas de seções com aço, que respondem bem a todos os tipos de esforços.

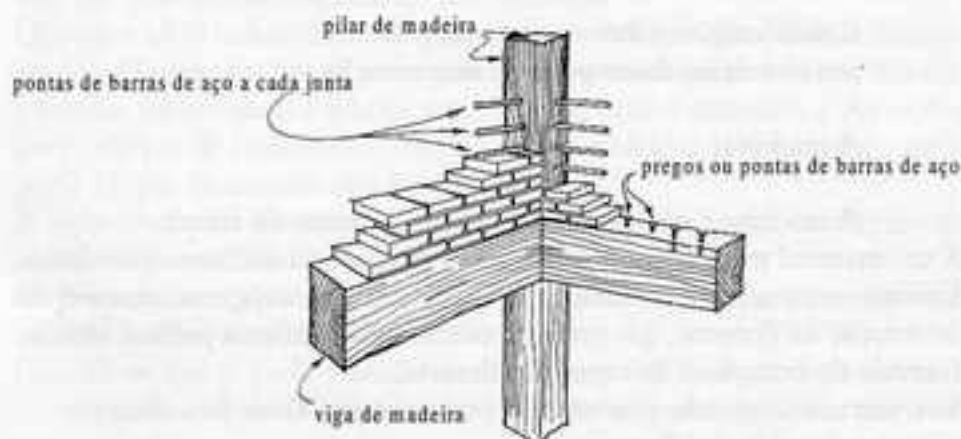
O concreto armado

O concreto armado é um material que necessita de uma fôrma na qual possa endurecer e criar condições de absorver os esforços para os quais foi projetado. Podemos obter, com o concreto armado, qualquer forma de seção, residindo a dificuldade na execução das fôrmas.
Essa dificuldade pode ser reduzida ao mínimo com procedimentos de pré-moldagem, em canteiro ou na indústria, onde fôrmas complexas podem ser elaboradas, com madeira ou aço; a utililização repetida viabiliza os custos envolvidos na sua execução.
No concreto armado, somente a armação tem capacidade de resistir satisfatoriamente ao esforço de tração simples; qualquer seção terá a mesma resposta a esse tipo de esforço, não havendo aqui seção ideal, a não ser pelas condições de execução da fôrma.
Em princípio, esse tipo de esforço deve ser evitado no trato com o concreto armado.
A seção ideal para o esforço de compressão simples - a circular vazada - apresenta extrema dificuldade de execução, não sendo, portanto, usada.
A seção circular cheia, próxima da ideal, é relativamente fácil de ser executada com fôrmas especiais de papelão.
Outras seções, como as quadradas, também muito interessantes para compressão, apresentam grande simplicidade de execução.
A seção ideal para momento fletor, a I, pode ser feita facilmente com concreto armado.
Sua execução é bastante facilitada nos processos de pré-moldagem, devido à maior facilidade de execução e ao reaproveitamento das fôrmas.
A seção retangular, próxima da ideal para esse esforço, é muito fácil de ser executada com o concreto armado.

Considerações sobre os materiais, sua obtenção, desempenho e manutenção

A madeira

A madeira é obtida naturalmente do tronco da árvore.
É um material renovável, quando seu uso e reposição são bem controlados.
Existem contra a sua utilização argumentos ecológicos, como o da devastação de florestas, que pode ser contornada com uma política séria de controle de extração e de reposição florestal.
Sua extração, quando controlada, pode ser um fator benéfico para o rejuvenescimento das florestas.

O uso da madeira em estruturas exige a escolha de material que tenha boa resistência mecânica e à deterioração.
Para isso são necessários cuidados especiais, como a extração em época adequada, ou seja, em meses não muito chuvosos (no Brasil, em meses que não têm a letra r : maio, junho, julho, agosto) e na fase minguante da Lua, quando a seiva se torna menos superficial.
A madeira necessita de uma secagem cuidadosa, com um grau de umidade adequado para cada ambiente em que vai ser usada, para que não apresente deformações indesejadas ao ser utilizada na estrutura.
Deverá ser seca quando usada em ambientes secos e mais úmida quando em ambientes úmidos, de forma que a troca entre o material e o meio ambiente seja a menor possível.
A aplicação da madeira em estruturas não é imediata.
Para ser transformada em bitolas comerciais, com dimensões padronizadas, a madeira precisa ser beneficiada em serrarias.
Quando as dimensões exigidas pelo projeto forem diferentes das bitolas comercialmente padronizadas, o custo do metro cúbico da madeira transformada aumenta.
A madeira é geralmente obtida em locais distantes dos de utilização, havendo necessidade de transporte a longas distâncias, o que aumenta seus custos. Sua aplicação na estrutura exige uma mão-de-obra especializada. Os detalhes de emendas e de ligações entre as peças exigem bastante habilidade. São detalhes freqüentemente trabalhosos.
Graças à sua grande sensibilidade, alterações no meio ambiente provocam na madeira variações volumétricas maiores do que nos demais materiais componentes da edificação, como as alvenarias e os pisos de concreto e cerâmicos, exigindo, portanto, preocupação especial no seu contato com esses materiais.
A figura a seguir, mostra uma das soluções mais usuais para essas interfaces.

A madeira deteriora-se facilmente quando sofre grande variação na sua umidade, exigindo cuidadosa proteção, seja por meios físicos ou por meios químicos, pelo uso de produtos impermeabilizantes.
Quando submersa, deve ser evitada a variação do nível da água.
Seu contato direto com o solo deverá ser evitado, usando-se soluções especiais para fazer a ligação entre a estrutura e a fundação.
O ataque de fungos e de insetos deve ser combatido com a aplicação de fungicidas e de inseticidas.
Para que se possa dar adequada manutenção, deverão ser evitadas frestas entre a madeira e outras partes da edificação que dificultem o acesso dos agentes protetores.
A madeira apresenta grande risco quando exposta a incêndios.
Não existem formas de proteção eficientes, a não ser quando revestidas por materiais não-inflamáveis, o que pode inviabilizar o seu emprego , pois a aparência natural é o principal motivo da sua utilização.
Podemos concluir que a madeira, como material estrutural, exige cuidados sérios para a sua obtenção e aplicação.
A falta desses cuidados pode afetar a qualidade da madeira e até mesmo do meio ambiente. A sua manipulação requer uma mão-de-obra especializada, quase em extinção.
A madeira apresenta também certa dificuldade de interagir com outros materiais da edificação.
A sua manutenção, no entanto, é relativamente simples e barata.

O aço

O aço é um material obtido industrialmente sob rigoroso controle de qualidade. É uma liga cujos componentes principais são o ferro e o carbono, sendo este último quem determina a resistência e a ductilidade do material. Quanto maior a quantidade de carbono, maior a resistência do aço mas menor a sua ductilidade.
A perda da ductilidade prejudica o seu uso como material estrutural, devido à fragilidade de sua ruptura.
Denomina-se ruptura frágil aquela que ocorre sem grandes deformações. As deformações exageradas denunciam que o material está próximo da ruptura.
O aço é um material que pode ser reaproveitado integralmente, quando se desmonta uma estrutura, ou quando, na forma de sucata, reprocessado, participa da produção do próprio aço. É, portanto, um material reciclável, podendo ser reutilizado indefinidas vezes.

O aço é produzido em usinas siderúrgicas próximas dos centros de maior demanda, não necessitando de transporte a grandes distâncias para a sua aplicação.
Para ser aplicado nas estruturas, o aço é fornecido sob a forma de barras, com secções padronizadas ou não.
A obtenção de secções não padronizadas pode ser feita pelo dobramento e soldagem de chapas planas. Este procedimento pode aumentar o seu custo.
As emendas e os vínculos entre peças estruturais são facilmente resolvidos com o uso de soldas e de parafusos.
Cuidados especiais devem ser tomados quando do contato do aço com outros materiais da edificação, como as alvenarias e o concreto.
Neste último, a afinidade entre os dois materiais facilita os detalhes de execução. Face à grande resistência do aço, as seções estruturais tendem a ser esbeltas.
Quando da ocorrência de esforços de compressão, devido ao fenômeno da flambagem, ocorre a necessidade do aumento da quantidade de material na seção ou da criação de um conjunto de elementos adicionais para travamento, o que tende a aumentar o custo da estrutura.
A aplicação do aço exige mão-de-obra qualificada.
A construção de uma estrutura metálica ocorre em duas fases: a fabricação e a montagem.
A primeira ocorre numa indústria especializada e a segunda no canteiro da obra.
Disto resulta uma estrutura mais precisa e de mais rápida execução.
O aço sofre grande influência do meio ambiente, podendo deteriorar facilmente.
Necessita de proteção adequada por meio de pintura com tintas resistentes ou de revestimentos metálicos, como a galvanização.
O emprego de aços resistentes à corrosão evita uma manutenção mais rigorosa, mas encarece a estrutura.
O recurso a seções tubulares ou fechadas exige um cuidado maior, pois há o risco de a deterioração não ser percebida, por ocorrer de dentro para fora. Neste caso, é mais seguro o uso de aços resistentes à corrosão.
O aço apresenta perda de resistência quando exposto ao fogo, podendo chegar à metade da sua resistência máxima quando a temperatura atingir 550 ° C. Essa característica exige uma rigorosa proteção, que pode ser feita pelo envolvimento da estrutura por materiais não-inflamáveis, como alvenaria, gêsso, e outros, ou, ainda, pela utilização de resinas protetoras, que acarretam um grande aumento de custo.
Por outro lado, o aço apresenta a virtude de readquirir as suas características iniciais após seu resfriamento.

Pode-se concluir que o aço é um material fácil de ser encontrado e rápido de ser aplicado, necessitando de mão-de-obra especializada para a sua manipulação.
Tem seus custos elevados pela necessidade de estabilização contra a flambagem, de proteção contra incêndios e ao ataque do meio ambiente.

O concreto armado

O concreto armado é um material obtido pela associação de um material resistente à compressão, o concreto, com um material resistente à tração, o aço. Para que seja um material eficiente, é necessário que o aço tenha uma ligação perfeita com o concreto, que é denominada aderência.
Sendo um material oriundo da mistura de outros materiais, as características finais do concreto dependem do controle cuidadoso da mistura; é um material que pode ser obtido em qualquer lugar, inclusive na obra, desde que existam areia, cimento , pedra e água disponíveis, não apresentando, portanto, dificuldades de transporte.
É um material cuja técnica é de domínio público, não exigindo mão-de-obra especializada.
Não é reciclável, tornando-se entulho após o seu desmonte.
Para a execução de peças estruturais, o concreto armado necessita de fôrmas.
A plasticidade do material permite a obtenção de formas livres e complexas, apenas limitadas pela maior ou menor dificuldade de execução da fôrma correspondente. Para adquirir as suas propriedades finais, necessita permanecer na fôrma por um período relativamente longo, denominado período de cura, o que diminui a velocidade da obra.
A cura pode ser acelerada com o uso de aditivos especiais que, por outro lado, podem causar efeitos colaterais, como danos à armação ou até mesmo, quando mal utilizados, a perda de resistência do concreto.
Em meios não agressivos, o concreto não exige grande manutenção, desde que observadas as condições mínimas de recobrimento da armadura. Cuidados especiais deverão ser tomados quando sujeito a meios agressivos.
Tem grande resistência quando submetido a incêndios.
Ao contrário do aço, se o incêndio provocar perda de resistência no concreto, esta será permanente, não sendo mais recuperada após o resfriamento.
Podemos concluir que o concreto armado é um material de fácil obtenção e manuseio. Permite bastante liberdade nas formas das peças estruturais.
É um material que pode resultar em peças extremamente volumosas e pesadas. Tem uma velocidade de execução relativamente lenta, mas não necessita de manutenção especial.

Tabela de avaliação dos materiais

Esta tabela resulta das observações feitas nos itens anteriores. Nela, procura-se dar uma visão geral das diversas relações entre os materiais estruturais - madeira, aço e concreto armado - e das diversas variáveis de sua utilização, como esforços atuantes, formas das secções, forma de obtenção e aplicações.

ITEM	MADEIRA	AÇO	CONCRETO
1. MATERIAL X ESFORÇO			
1.1. ÍNDICE DE EFICIÊNCIA	4	5	2
1.2. ÍNDICE DE CONFIANÇA	2	5	4
1.3. TRAÇÃO SIMPLES	3	5	2
1.4.COMPRESSÃO SIMPLES	4	3	5
1.5. MOMENTO FLETOR	3	4	4
SUB-TOTAL	17	22	17
2. MATERIAL X SECÃO			
2.1. OBTENÇÃO DAS SECÕES	4	4	4
2.2. TRAÇÃO SIMPLES	4	5	2
2.3. COMPRESSÃO SIMPLES	4	5	4
2.4. MOMENTO FLETOR	4	5	4
SUB-TOTAL	16	19	14
3. MATERIAL X OBTENÇÃO APLICAÇÃO E MANUTENÇÃO			
3.1. FATÔRES ECOLÓGICOS	3	4	4
3.2. PROCESSO DE OBTENÇÃO	3	4	4
3.3. DISPONIBILIDADE DO MATERIAL	3	4	5
3.4. VELOCIDADE DE APLICAÇÃO	4	5	3
3.5. DISPONIBILIDADE DE MÃO DE OBRA	3	3	5
3.6. INTERFACE COM OUTROS MATERIAIS	3	3	5
3.7. DURABILIDADE	4	3	4
3.8. EXPOSIÇÃO AO INCÊNDIO	1	2	4
SUB-TOTAL	24	28	34
TOTAL	57	69	65

As notas de 1 a 5 são resultado da avaliação de 5 pontos, ou seja:

1 = Péssimo, 2 = Ruim, 3 = Regular, 4 = Bom e 5 = Ótimo.

Vale lembrar que o índice de eficiência é a relação entre a tensão máxima de resistência do material e o seu peso específico.
O índice de confiança é dado pelo inverso do valor do coeficiente de segurança.
Os valores da subtotalização dos pontos, para cada item, mostram a maior ou menor aptidão do material para aquela situação.
É importante ressaltar que as pontuações apresentadas nesta tabela partem de valores atribuídos pelo autor em função de uma avaliação pessoal; outros poderão discordar das pontuações e provavelmente chegarão a valores pouco diferentes.
O que importa, como resultado, é que a tabela possa refletir de maneira clara e imediata como o seu construtor vê as diversas relações apontadas, e que, a partir dela, consiga manipular objetivamente essas relações, orientando o processo de concepção estrutural.

CAPÍTULO 2

Análise dos Sistemas Estruturais Básicos sob os Aspectos do Comportamento Físico e dos Materiais

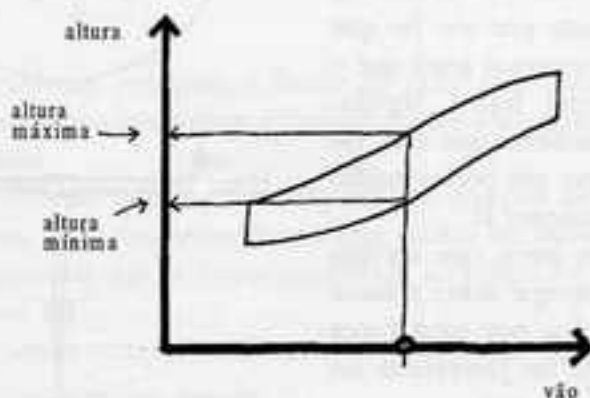
Sistemas estruturais básicos

Introdução

Nos próximos itens, será apresentada uma série de sistemas estruturais básicos compostos de barras, a partir dos quais, por meio de associações adequadas, pode-se criar uma quantidade quase infinita de possibilidades estruturais.

O estudo desses sistemas estruturais será dividido em alguns sub-itens, nos quais serão discutidos o seu comportamento estático, os materiais e seções mais usuais para a sua execução, as condições de aplicação e os limites de utilização e, finalmente, os elementos para o seu pré-dimensionamento.

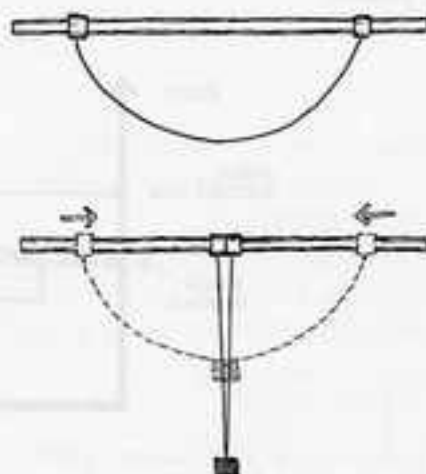
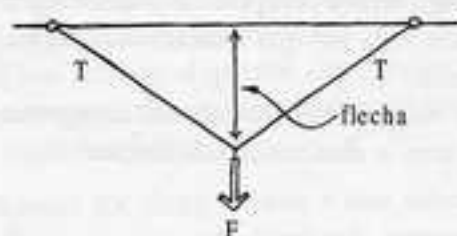
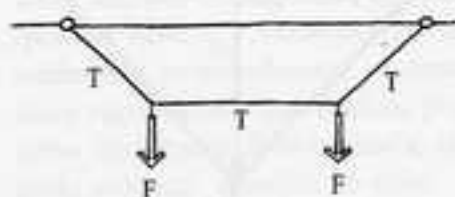
O pré-dimensionamento dos sistemas estruturais é feito recorrendo a gráficos que foram elaborados pelo prof. Philip A. Corkill, da Universidade de Nebraska, e traduzidos e adaptados para o sistema métrico pelos professores Yopanan C. P. Rebello e Walter Luiz Junc com a colaboração da arquiteta Luciane Amante.

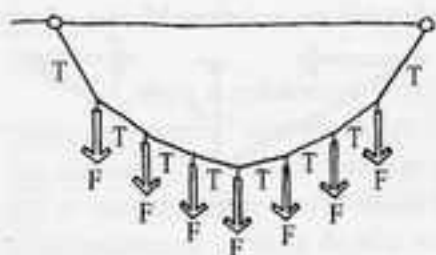
Os gráficos apresentam, nas abscissas, valores que correspondem a uma das variáveis, como vãos, quando se trata de estruturas como cabos, vigas e treliças, ou número de pavimentos ou altura não travadas, quando se trata de pilares.

Nas ordenadas, estão os valores correspondentes, resposta do pré-dimensionamento, como flecha do cabo, altura da seção do arco, da viga e da treliça, ou, ainda, a dimensão mínima de um dos lados da seção do pilar.
Os gráficos não são apresentados na forma de uma linha, mas de uma superfície contida entre duas linhas; a superior representa os valores máximos de pré-dimensionamento e a inferior, os valores mínimos.
O uso do limite inferior ou superior depende de bom senso.
Se a estrutura for pouco carregada, como as estruturas de cobertura, usaremos o limite inferior, ou, na dúvida, a região intermediária.
Quando a estrutura é bastante carregada usamos o limite superior.

O cabo

a. Comportamento

O cabo é uma barra cujo comprimento é tão predominante em relação à sua seção transversal que se torna flexível, ou seja, não apresenta rigidez nem à compressão nem à flexão.
Em outras palavras, o cabo não apresenta qualquer resistência a esforços de compressão e de flexão, deformando-se totalmente quando submetido a esses esforços. O cabo apresenta resistência apenas quando tracionado, devendo ser usado em situações em que ocorra esse tipo de esforço.
Como foi visto anteriormente, o esforço de tração simples é o mais favorável, resultando em elementos estruturais muito esbeltos, portanto leves tanto física como visualmente. Por isso, as estruturas de cabos, também chamadas estruturas suspensas ou pênseis, são estruturas que podem vencer grandes vãos com pequeno consumo de material.

Para se entender o comportamento de um cabo, suponha-se o modelo ao lado, composto por um fio que tenha em seus extremos anéis que o prendam a uma barra rígida. Suponha-se, também, que esse fio seja carregado em seu ponto médio por um peso qualquer P.
A tendência dos anéis, que servem de apoio, é escorregar sobre a barra rígida, solicitados por uma força horizontal, até se juntarem na mesma vertical do peso.

Para evitar esse escorregamento, devemos fixar os anéis em um ponto qualquer da barra rígida.
O cabo, nessa posição, adquirirá uma forma triangular.
Chamaremos de flecha do cabo a altura do triângulo assim formado.

Se se alterar a posição e/ou a quantidade de cargas, o cabo apresentará, para cada situação, uma forma diferente.
Colocando nesse cabo duas cargas iguais e simétricas, o cabo se deformará e apresentará a conformação de um trapézio.

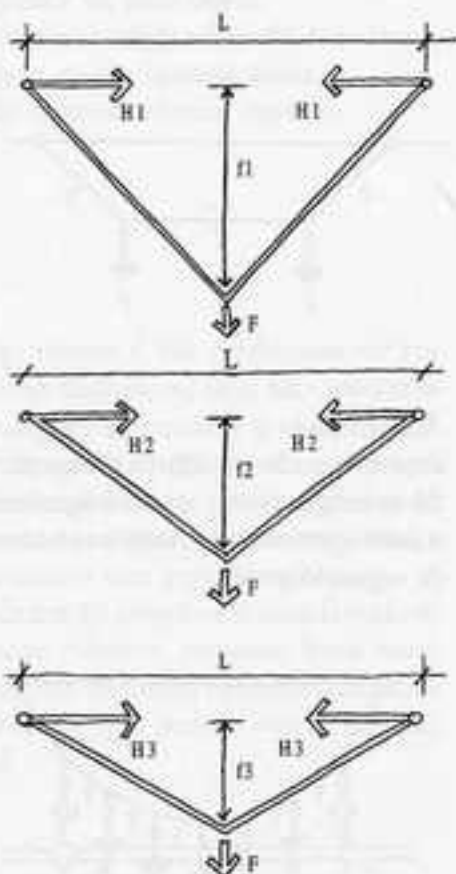
Aumentando o número de cargas, para cada conjunto o cabo apresentará uma forma de equilíbrio diferente.
Se as cargas forem iguais e igualmente espaçadas em relação à horizontal, o cabo apresentará, quando totalmente carregado, a forma de uma parábola de segundo grau.

Se as cargas forem iguais mas igualmente espaçadas ao longo do comprimento do cabo, como acontece com o seu peso próprio, a curva será ligeiramente diferente da parábola e se chamará catenária.

Nessas duas últimas situações, a flecha do cabo será dada pela distância entre a horizontal que passa pelos apoios do cabo e o seu ponto mais afastado dessa horizontal.
As diversas formas que o cabo adquire em função do carregamento denominam-se funiculares das forças que atuam no cabo ou, em outras palavras, o caminho que as forças percorrem ao longo do cabo até chegar aos seus apoios.
A palavra funicular vem do vocábulo latino funis, que significa corda, e do grego gonia, que significa ângulo.

Como o cabo só admite esforço de tração simples, devido às suas condições de rigidez, conclui-se que as forças ao longo do seu comprimento são sempre de tração simples e variam de intensidade toda vez que mudam de direção, aumentando do meio do vão para o apoio.
Para um determinado carregamento e vão, a força horizontal necessária para dar o equilíbrio ao cabo aumenta com a diminuição da flecha.

Isso poderá ser facilmente verificável com uma simples experiência: suponha-se que se esteja suportando com as mãos uma das extremidades de uma corda, que sustenta um peso aplicado no meio; sem sair da posição procure-se retificar essa corda.

Notar-se-á que se será obrigado a puxar cada vez com maior força, ou seja, a aplicar uma força horizontal cada vez maior.

Conclui-se desse fato que existe uma relação inversa entre a flecha do cabo e a reação horizontal nos apoios, com a reação vertical mantendo-se constante, pois esta só depende do peso aplicado ao cabo.
Pode-se também verificar que, para dado carregamento e vão, a solicitação no cabo depende da variação da força horizontal, portanto do valor da flecha.
Conclui-se daí que quanto menor a flecha maior será a solicitação no cabo.
Aqui surge um interessante problema: um cabo com flecha pequena é mais solicitado, requerendo, pois, maior seção; por outro lado, tem um comprimento menor, o que corresponde a um determinado volume de material; se a flecha for grande será menos solicitado, logo terá uma seção menor, mas em compensação um comprimento maior, resultando em outro volume de material.

Portanto, deve existir uma relação entre flecha e vão que resulte no menor volume de material.
Essa relação depende do tipo de carregamento e encontra-se entre os seguintes limites:

$$\frac{1}{10} < \frac{f}{L} < \frac{1}{5}$$

onde: f: flecha do cabo
L: vão do cabo.

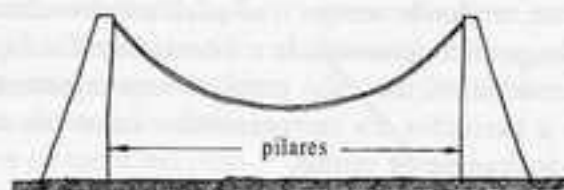
Como foi visto, o cabo é um sistema estrutural que não apresenta uma forma permanente, tendendo sempre a adquirir a forma diretamente ligada à posição, direção, sentido, quantidade e intensidade das forças que atuam sobre ele; por conseguinte, um cabo torna-se uma estrutura pouco estável quando sujeito a variações no carregamento, como no caso de cargas acidentais, principalmente os ventos.
Essa variabilidade nas formas, produzida por forças que apresentam uma certa freqüência de ocorrência, ou seja, carregam e aliviam várias vezes, pode provocar vibração no cabo.
Se, por coincidência, tiver freqüência própria idêntica à freqüência que o faz vibrar, o cabo entra em ressonância; os esforços sobre ele se alternarão - ora solicitando-o, ora aliviando-o - podendo provocar fadiga no material, rompendo-o. Para evitar esse fenômeno, deve-se criar condições de alterar a freqüência própria do cabo, enrijecendo-o por meio de sua associação com outros elementos estruturais.
Conclui-se que o cabo é um sistema estrutural que, para ser estável, deverá estar sempre associado a outros sistemas estruturais.

b. Materiais e seções usuais

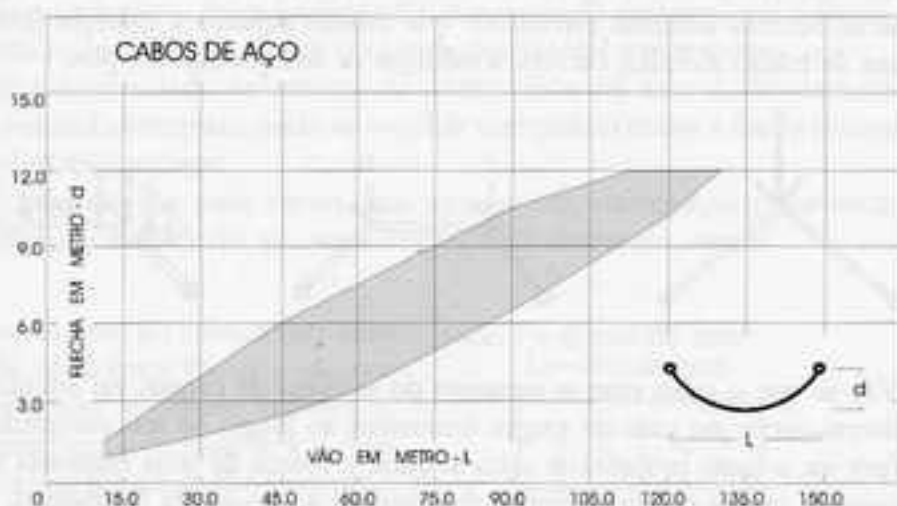
Como o cabo está sujeito apenas a esforços de tração simples, qualquer material que apresente boa resistência a esse tipo de esforço pode ser utilizado. Dos materiais que apresentam essa característica, o aço, por ser o material estrutural mais resistente à tração, é o mais indicado, principalmente os aços de alta resistência.
Viu-se que qualquer forma de seção pode ser utilizada para esforços de tração simples; as seções que apresentam concentração de massa junto ao centro de gravidade são as que ocupam menores espaços, o que conduz a seção circular plena a ser a mais indicada para utilização nos cabos.

c. Aplicações e limites de utilização

O cabo de aço, quando submetido apenas ao próprio peso, pode vencer um vão de aproximadamente 30 km, muitas vezes superior a qualquer outro sistema estrutural.

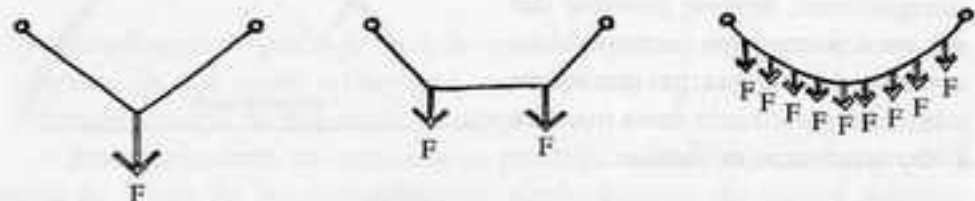
Apesar dessa virtude, o cabo apresenta como desvantagens a absorção do empuxo horizontal e a sua instabilidade de forma quando submetido a variações de carregamento.
A absorção dos empuxos pode ser feita por pilares livres ou atirantados.
No primeiro caso, o pilar ficará sujeito, além do esforço de compressão simples, ao esforço de flexão, o que em princípio prejudica bastante a economia, pois o pilar passaria a ter dimensões muito grandes.

No segundo caso, o esforço do empuxo é absorvido por outro cabo - o tirante - que liga a cabeça do pilar à fundação. Esta última solução resulta num pilar mais econômico.

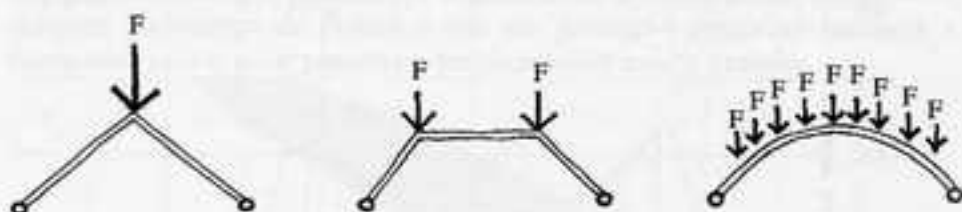
De qualquer forma, em ambos os casos, os esforços são transmitidos para a fundação, onde são absorvidos por elementos muito pesados e caros, por vezes extremamente complexos em sua execução.
O uso do cabo em estruturas de pequeno porte não é muito freqüente, em virtude da sua característica de instabilidade sob cargas variáveis, exigindo composições com outros elementos estruturais que lhe garantam esta estabilidade. Essas composições levam a uma maior complexidade da estrutura, em prejuízo dos benefícios que em princípio o cabo poderia apresentar. Nos grandes vãos, a maior complexidade das composições é facilmente absorvida pelas vantagens econômicas e estéticas apresentadas pelo seu uso.
Com os tipos de aço disponíveis hoje, pode-se atingir limites de vãos em torno de 1.500 m para pontes, como a do estreito de Messina, ou em torno de 5.500 m, para linhas de transmissão, como algumas linhas de transmissão de energia, na Noruega.
Esses valores correspondem a valores próximos dos limites admitidos para a tecnologia disponível.

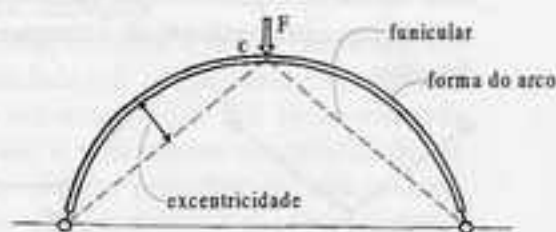
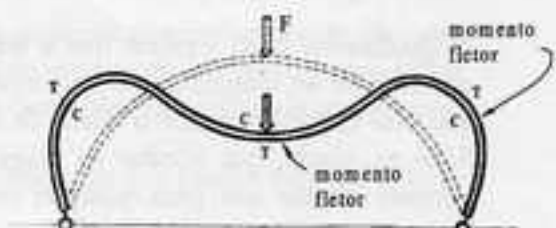
d. Pré dimensionamento de cabos

Obs: o diâmetro do cabo é da ordem de um milésimo do vão.

O arco

a. Comportamento

Para entender o comportamento do arco, é útil lembrar a análise feita para o cabo. O cabo, quando solicitado por um carregamento, adquire uma forma de equilíbrio que varia com a posição e a quantidade de cargas; assim, para cada conjunto de carregamento, tem-se uma determinada forma do cabo .

É igualmente bom lembrar que a forma que o cabo adquire corresponde exatamente ao caminho que as forças percorrem até chegar aos apoios, e que esse caminho recebe o nome de funicular.
Sabe-se, ainda, que o cabo só reage a esforço de tração simples, o que permite afirmar que, para qualquer situação de carregamento sobre o cabo, este estará sempre sujeito a esforço de tração simples.

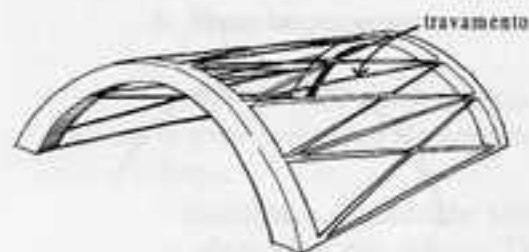
Se cada um dos funiculares for invertido simetricamente em relação à horizontal, usando-se agora não mais um cabo, mas um elemento rígido, serão obtidos sistemas estruturais que estarão sujeitos a esforços inversos aos de tração simples, ou seja, a esforços de compressão simples.

Viu-se que o cabo, com o aumento do número de cargas, vai adquirindo forma curva; no caso de cargas uniformes ao longo do seu comprimento (por ex. o peso próprio), o cabo adquire a forma de uma catenária e, no caso de cargas uniformemente distribuídas ao longo da horizontal, a de uma parábola de segundo grau.
Nesses dois casos, o cabo continua sujeito a tração simples.
Se essas formas forem rebatidas, usando um elemento rígido, resultarão dois arcos que estarão solicitados apenas por esforços de compressão simples.
Viu-se, anteriormente, que os esforços de tração e de compressão simples são os mais favoráveis por resultar em estruturas mais leves.
Portanto, é interessante que os arcos estejam submetidos exclusivamente a esforços de compressão simples, evitando esforços de flexão, que aumentam suas dimensões e os tornam anti-econômicos.

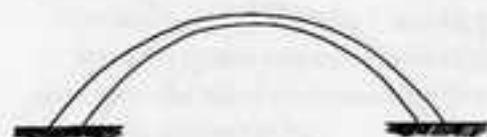
Como a ocorrência desses esforços depende da forma do arco e do seu carregamento, deve-se procurar dar aos arcos formas que correspondam aos funiculares das cargas que atuam sobre eles, garantindo dessa maneira a não ocorrência de flexão.

Cada vez que o funicular das cargas desvia-se do eixo do arco originam-se esforços de flexão, sendo que quanto maiores forem os desvios maiores serão esses esforços.

Como pode ser entendido como um sistema simétrico ao cabo, o arco apresenta também reação horizontal nos apoios.
Como no cabo, essa força horizontal é inversamente proporcional à flecha. Quanto maior a flecha menor o empuxo horizontal e vice-versa.
Como a intensidade do esforço de compressão no arco é diretamente proporcional ao empuxo, pode-se concluir que quanto maior a flecha menor é a solicitação no arco.
Arcos abatidos são mais curtos, mas apresentam maior seção transversal; arcos com grande flecha são mais longos, mas têm seção menor.

Como no caso do cabo, existe uma relação ideal entre flecha e vão que nos permite o menor volume e, portanto, um arco mais leve e mais econômico. Essa relação é a seguinte:

onde: f = flecha do arco
L = vão do arco

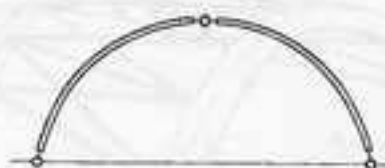
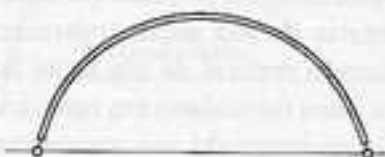
$$\frac{1}{10} < \frac{f}{L} < \frac{1}{5}$$

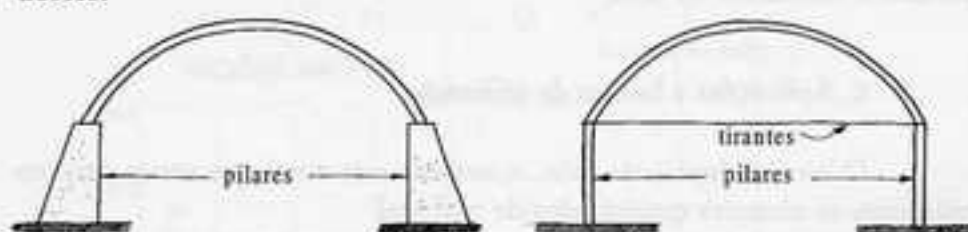
Como é um elemento estrutural longo e submetido a compressão, o arco está sempre sujeito a flambagem, seja no seu plano como fora dele. Como seus extremos são fixos e impedidos de se aproximar, o arco pode atingir esbeltez superior à das barras, cujos extremos tendem a aproximar-se durante a deformação, como no caso dos pilares.

A estabilização do arco contra a flambagem fora do seu plano pode ser feita por travamentos perpendiculares ao seu plano.

Para flambagem no plano do arco, deve-se elevar a sua rigidez, aumentando a inércia da sua seção transversal, nesse plano, ou seja, aumentando a dimensão vertical da sua seção transversal.
Para arcos funiculares em catenária ou parabólicos, o esforço de compressão varia ao longo do seu comprimento, sendo mínimo no topo e máximo junto aos apoios.

Para efeito de maior economia de material, pode-se variar a seção ao longo do comprimento, fazendo-a máxima junto aos apoios.

Como os esforços nos arcos dependem da sua forma e do carregamento, é óbvio que alterações - quer no carregamento, quer na forma - acarretam mudança nos esforços, podendo fazer com que um arco submetido apenas a compressão simples passe a apresentar esforços indesejáveis de flexão. Alterações na forma causadas por dilatações térmicas, por retração do material ou, ainda, por deformações imediatas ou lentas podem provocar alterações no estado de solicitação do arco, pois estarão sendo introduzidos esforços para os quais o arco não foi dimensionado, podendo levá-lo à ruína em casos mais drásticos.

Os arcos podem apresentar alguns vínculos que permitam rotação relativa entre duas seções adjacentes.
O número máximo de articulações que podem ocorrer num arco é 3. Acima desse número, o arco torna-se hipostático, inviabilizando-se. Essas articulações normalmente ocorrem nos apoios e no topo.

Um arco com três articulações é denominado arco triarticulado.

Quando as articulações ocorrem apenas nos seus apoios, é denominado arco biarticulado.

Arcos que não apresentam articulações são denominados arcos biengastados.

Os arcos triarticulados podem adaptar-se bem a mudanças de forma, absorvendo melhor a variação dos esforços.
São arcos que, por poder ser montados em partes, permitem uma execução mais simples. Por outro lado, esses arcos são mais sensíveis à flambagem, exigindo maiores cuidados na sua estabilização.
Os arcos biarticulados, por serem mais restringidos em seus movimentos do que os triarticulados, sofrem maiores influências quando ocorrem variações nas suas formas, provocadas pelas deformações devidas ao comportamento do material ou térmicas.
O arco, como o cabo, apresenta empuxos horizontais. Estes podem ser absorvidos diretamente pelos apoios, exigindo desses um dimensionamento maior, ou por tirantes, que fazem com que apenas cargas verticais sejam depositadas nos apoios, diminuindo as dimensões destes.

b. Materiais e seções usuais

Como no arco predominam esforços de compressão simples, as seções e os materiais ideais são aqueles que apresentam melhor desempenho a esse esforço.
O aço, a madeira e o concreto armado são materiais que apresentam resistência adequada a esse esforço. O aço, por ter maior resistência, resulta em estrutura mais leve, sendo indicado para grandes vãos.
A madeira, por ser o material mais suscetível ao fogo, é usada quando o efeito estético se impõe.
O concreto é usado quando ocorrem problemas de manutenção, sendo o material que implica a estrutura mais pesada.
Seções com material distribuído predominantemente longe do centro de gravidade são as mais indicadas.
Assim, o tubo de seção circular seria a seção ótima.
Entretanto, ela quase não é usada, por causa da dificuldade de curvar tubos de aço e da quase impossibilidade de obter seção circular de madeira ou de concreto. As mesmas considerações podem ser feitas para os tubos de seção quadrada e retangular.

Em vista disso, são usadas secções retangulares, com largura menor do que a altura, já que os arcos são freqüentemente travados transversalmente por elementos estruturais que sobre eles se apoiam.
No caso do aço e da madeira, para maior facilidade de execução da curvatura, são usadas peças descontínuas, ou seja, estruturas de barras, como as treliças, assunto a ser apresentado mais adiante.
A madeira apresenta ainda a possibilidade de execução de peças de seção cheia, utlilizando a composição de sarrafos curvados e colados entre sí, constituindo as denominadas peças laminadas.
O concreto armado, por ser um material moldável, não apresenta grande dificuldade de curvatura, mas apresenta, por outro lado, a dificuldade de execução das fôrmas no local.
Os arcos de aço e de madeira podem ser executados fora do local, numa fábrica, e montados na obra.

c. Aplicações e limites de utilização

O arco é, depois do cabo, o sistema estrutural que vence maiores vãos com as menores quantidades de material.
Por isso, o uso do arco ocorre principalmente quando se necessita vencer vãos de médio e grande porte, como coberturas de galpões e pontes.
No caso das coberturas, são atingidos, com certa facilidade, vãos da ordem de 120 metros, como em hangares de avião, e até de 500 metros , como na ponte de Sando, na Suécia. Este vão foi atingido com um arco de aço.

d. Pré-dimensionamento do arco

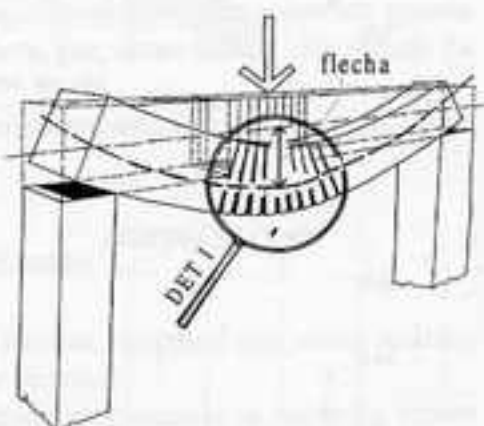
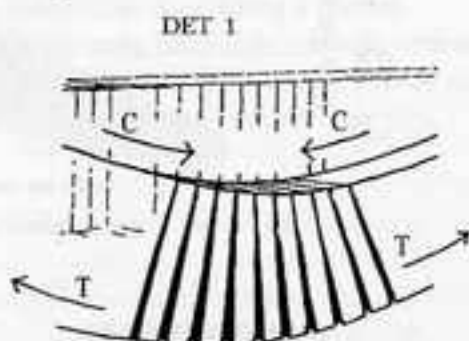
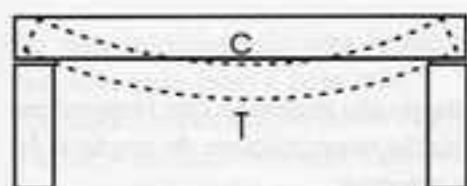
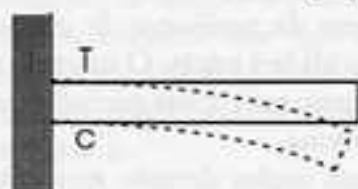
ARCO TRELIÇADO - AÇO
ESPESSURA EM METRO - D
0.3
0.6
0.9
1.2
1.5
ALTURA EM METRO - H
15.0
12.0
9.0
6.0
3.0
VÃO EM METRO - L
0
9.0
18.0
27.0
36.0
45.0
54.0
63.0
72.0
81.0
90.0
D
H
L
ARCO DE MADEIRA
ESPESSURA EM METRO - D
0.3
0.6
0.9
1.2
1.5
ALTURA EM METRO - H
30.0
24.0
18.0
12.0
6.0
VÃO EM METRO - L
0
9.0
18.0
27.0
36.0
45.0
54.0
63.0
72.0
81.0
90.0
D
H
L
ARCO DE CONCRETO
ESPESSURA EM METRO - D
0.6
0.9
1.2
1.5
1.8
ALTURA EM METRO - H
30.0
24.0
18.0
12.0
6.0
VÃO EM METRO - L
0
12.0
24.0
36.0
48.0
60.0
72.0
84.0
96.0
108.0
120.0
D
H
L

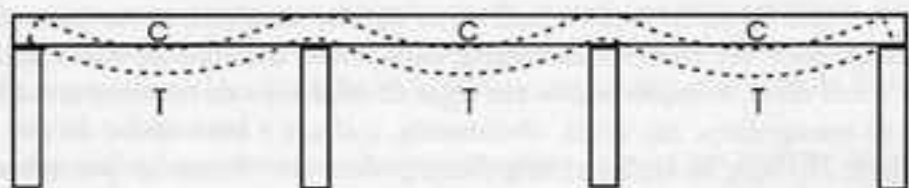
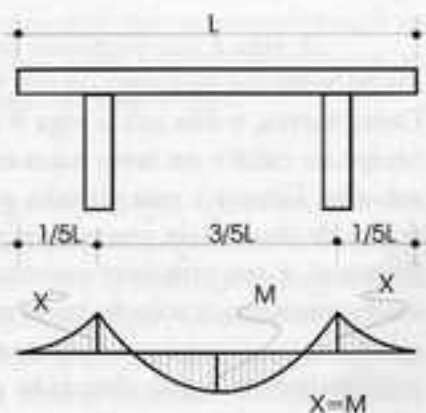
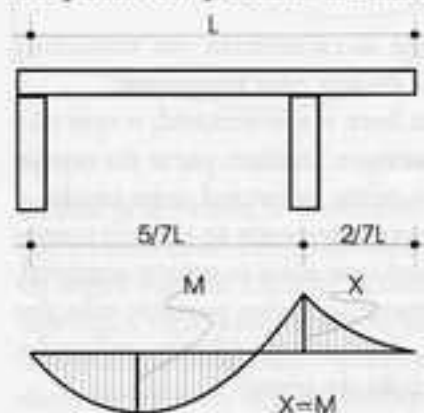
A viga de alma Cheia

a. Comportamento

Chama-se alma de uma viga a porção vertical da sua seção. A viga de alma cheia é aquela que não apresenta vazios em sua alma. Quando uma barra horizontal, apoiada em seus extremos, é solicitada por cargas transversais ao seu eixo ela se deforma.

Ao sofrer essa deformação, as seções transversais giram em torno do seu eixo horizontal e tendem a escorregar uma em relação à outra. O eixo da viga, antes reto, deforma-se verticalmente.
Aos deslocamentos verticais do eixo dá-se o nome de flecha.

DET 1

O giro das seções é provocado por um binário interno de forças, denominado momento fletor, que provoca flecha.
A tendência de escorregamento entre as seções é provocada por uma força vertical interna, denominada força cortante.

Portanto, uma viga é um sistema estrutural sujeito a dois esforços: momento fletor e força cortante.
Por estar sujeita predominantemente ao momento fletor, que é o esforço mais desfavorável na hierarquia dos esforços, a viga é o sistema estrutural que exige maior consumo de material e maior resistência.
Pode-se dizer que a viga está no extremo oposto ao do cabo, quanto às condições de consumo de material.
Conforme a posição e a quantidade de apoios, as vigas podem ser classificadas em vigas biapoiadas, vigas em balanço e vigas contínuas.

As vigas biapoiadas têm a característica de serem solicitadas por tensões de compressão, nas fibras superiores, e de tração, nas fibras inferiores.

Nas vigas em balanço, essas tensões se invertem.

Nas vigas com mais de dois apoios, denominadas vigas contínuas, tem-se, nos vãos, compressão na parte superior e tração na parte inferior, ocorrendo o inverso nos apoios. Por convenção, os momentos que provocam tração nas fibras inferiores são considerados positivos, e ao contrário, negativos.

As vigas contínuas, por serem hiperestáticas, apresentam uma compensação entre os momentos dos vãos e dos apoios, resultando em valores menores do que os das vigas biapoiadas, de mesmos vãos e carregamentos.
Os balanços nas vigas, por apresentarem momentos contrários aos dos vãos centrais, ocasionam alívio nos valores dos momentos dos vãos, representando um fator de economia no dimensionamento da viga.
Existem relações favoráveis entre balanços e vãos, que resultam em valores mínimos de momentos na viga, como se pode apreciar na figura abaixo.
Essas relações são econômicas, por apresentarem momentos negativos iguais aos positivos, portanto mínimos.

b. Materiais e seções usuais

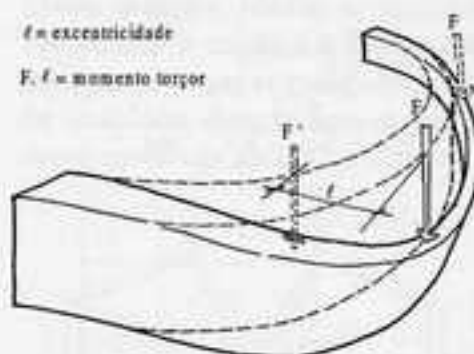
O aço, a madeira e o concreto armado são materiais que respondem bem a esforços de flexão, ou seja, à solicitação concomitante de tração e de compressão, já que resistem bem a esses esforços.
O concreto armado leva a desvantagem de necessitar de um segundo material, o aço, para aumentar a sua capacidade à tração. O concreto armado ainda apresenta uma segunda desvantagem: para a sua execução necessita de um terceiro material, a madeira da fôrma.
Sendo as vigas submetidas à flexão, suas seções deverão apresentar uma concentração de material longe do centro de gravidade, conforme comentado na discussão da relação entre os esforços e a forma da seção. Assim, a seção ideal para as vigas é a I. Devido à concentração de tensões, a mesa, parte horizontal da seção I, deve ser mais espessa do que a parte vertical, a alma.
No aço, essa forma de seção é facilmente obtida; na madeira e no concreto armado, pode ser também alcançada, com maior trabalho de elaboração. Por conta disso, as seções usuais em vigas de madeira e de concreto armado são as retangulares, nas quais, obviamente, a altura é bem maior do que a largura. No aço, as seções retangulares podem ser formadas por tubos, solução que acarreta maior consumo de material do que a seção I, já que os tubos têm seções com a mesma espessura em todo o seu perímetro.
Uma seção compatível com o concreto armado é a T.
Isso se deve ao fato de que o aço que compõe o concreto armado é cerca de vinte vezes mais resistente à compressão do que o concreto, o que determina a necessidade de uma quantidade de concreto muito maior do que a de aço, configurando, assim, a seção T. No caso de balanços, tem-se a situação oposta, implicando a utilização da seção T invertida.

c. Aplicações e limites de utilização

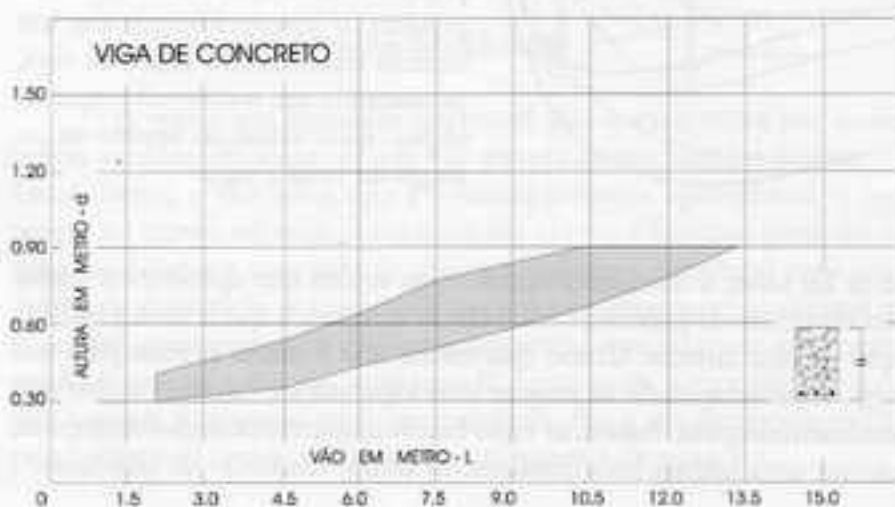
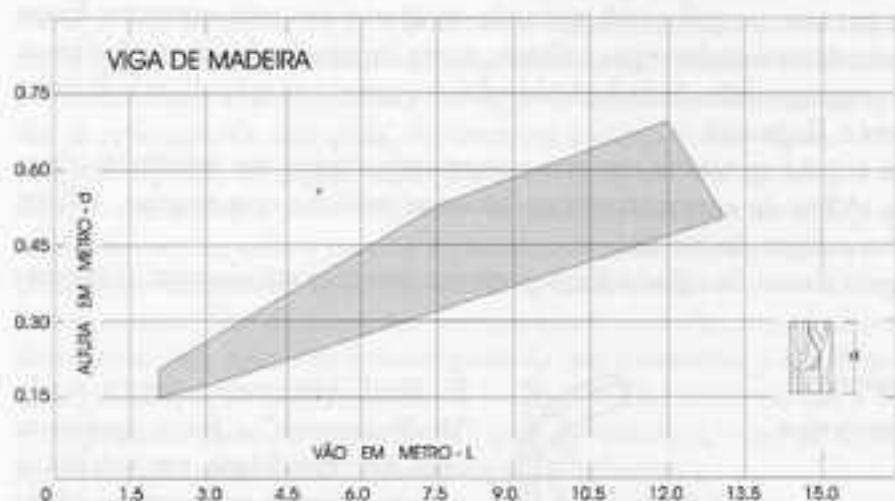
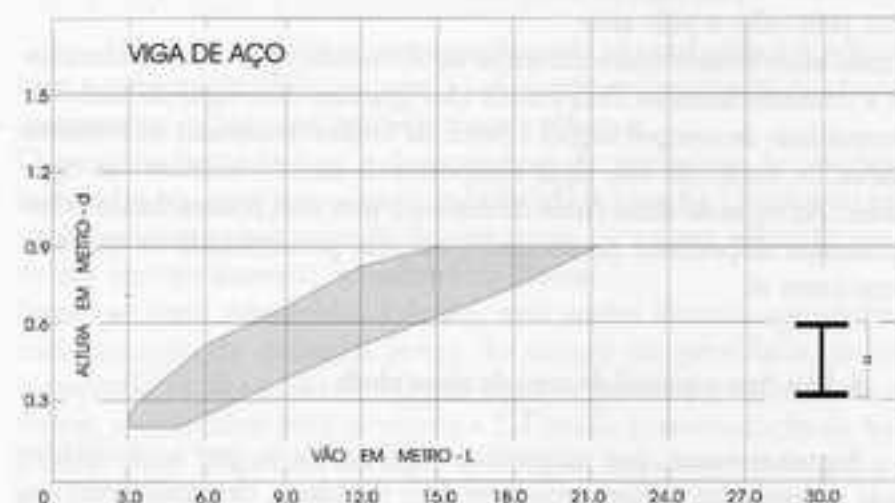
A viga é um elemento estrutural que se caracteriza por transmitir cargas verticais ao longo de um vão através de um eixo horizontal.
Dessa forma, o vão sob a viga é totalmente livre e aproveitável, o que não ocorre no cabo e no arco, cujos eixos são curvos e limitam parte do espaço sob eles. Graças a essa virtude, a viga é o sistema estrutural mais usado.
A viga de alma cheia, por estar sujeita predominantemente ao esforço menos favorável, é em princípio o sistema estrutural que mais consome material, sendo, portanto, a solução mais pesada. Entretanto, a viga permite soluções que tornam os espaços mais aproveitáveis, daí a sua freqüente utilização, principalmente como elemento de sustentação de pisos.

Os vãos vencidos pela viga de alma cheia são bem menores do que aqueles vencidos pelo cabo e pelo arco.
Na prática, esses limites ficam em torno de 20 metros, quando considerados o aço e o concreto armado. Para vencer vãos grandes com vigas de madeira, há a necessidade de compor seções a partir de bitolas comerciais de menores dimensões, ou, então, de usar vigas compostas de sarrafos colados - as vigas laminadas. As vigas de alma cheia de madeira têm seus limites dados pelos comprimentos disponíveis no mercado, ou pela possibilidade de emenda de barras entre si.

d. Um tipo especial de viga de alma cheia

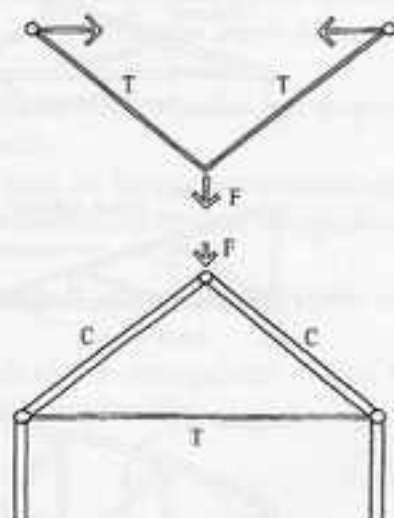
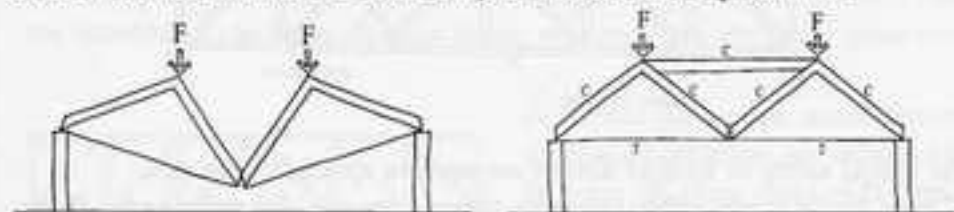
Algumas vezes, por exigências arquitetônicas, por necessidades espaciais ou estéticas, a viga projeta-se fora do plano, desenvolvendo em planta um arco ou poligonal, apoiando-se apenas nos seus extremos. Essas vigas são denominadas vigas balcões, nome originado da forma dos pisos que se projetam além da fachada do edifício, como nos episódios de Romeu e Julieta e Rapunzel.
A viga balcão apresenta um comportamento atípico em relação às vigas planas. Além de apresentarem os mesmos esforços que aquelas, sofrem também esforço de torção.
Na figura abaixo, imagine a força percorrendo a viga até alcançar os apoios.

É fácil observar que a cada "deslocamento" a força apresenta uma excentricidade em relação à posição anterior; essa excentricidade produz o aparecimento de um binário transversal à seção da viga, provocando um momento torçor na seção. Essa situação repete-se ao longo de toda a viga.

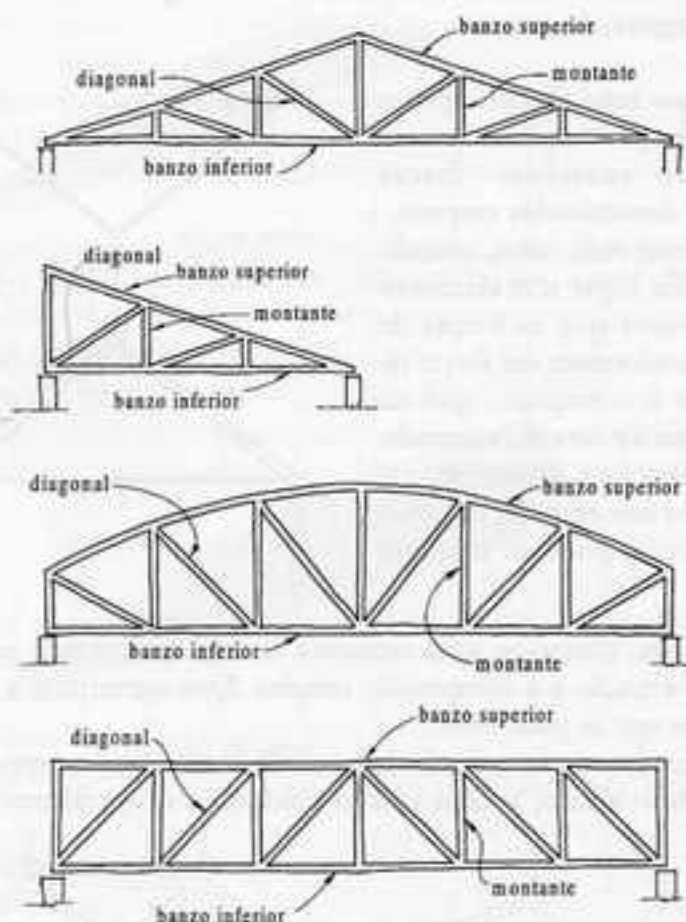
Como já foi visto, o momento torçor exige seções que apresentem massa distante do centro de gravidade em todas as direções, o que levaria à escolha da seção tubular circular. Como essa forma não é muito prática para uso em vigas, deve-se, quando se projeta uma viga balcão, escolher seções que se aproximem daquela. Assim, as vigas balcões, quando de seção retangular, deverão ter uma largura bem próxima da altura, tendendo ao quadrado.

e. Pré-dimensionamento de vigas de alma cheia

A treliça

a. Comportamento

A treliça é um sistema estrutural formado por barras que se unem em pontos denominados nós. Para se entender o comportamento da treliça, reporte-se ao modelo do cabo que sustenta uma carga no seu centro, como aparece na figura abaixo.

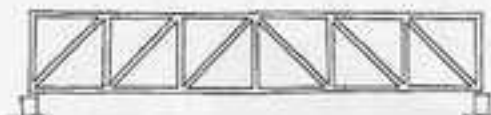
Sabe-se que o cabo absorve apenas esforços de tração simples e que, no seu apoio, aparecem forças horizontais denominadas empuxo.
Se se inverter esse cabo, usando agora em seu lugar um elemento rígido, ver-se-á que as forças de tração se transformam em forças de compressão e o empuxo, que na situação anterior estava ocorrendo de dentro para fora, inverte-se.
Para absorver esse empuxo, como no caso dos arcos, pode-se usar um tirante.

Dessa maneira, obtém-se uma estrutura triangular formada por barras submetidas a tração e a compressão simples. Esta estrutura é a treliça, a mais simples que se pode obter.
Se se colocar duas treliças dessas lado a lado, e se retirar o apoio central, como mostrado abaixo, as duas treliças tenderão a se aproximar.

Para evitar essa aproximação, pode-se colocar entre as duas treliças uma nova barra que as equilibre.
É fácil ver que essa barra estará submetida a compressão simples.
Ter-se-á, assim, uma treliça maior vencendo um vão maior.
Prosseguindo com este raciocínio, vão-se formando treliças cada vez maiores e que vencem vãos também maiores.

Em todas as situações, as treliças estarão sempre com suas barras submetidas a esforços de tração e de compressão simples.
As barras sempre formarão triângulos.
Essas são as duas características mais importantes da treliça.
Seguindo essas regras, podem ser criadas as mais diversas formas de treliças.
As barras das treliças recebem denominações especiais mostradas nas figuras abaixo.

As cargas sobre as treliças devem ser sempre aplicadas nos nós.
Cargas fora dos nós, sobre as barras, fazem com que elas trabalhem à flexão, um esforço menos favorável do que a compressão e a tração originais.
Essa situação exige maior dimensionamento das barras, tornando a treliça antieconômica.
A inclinação das diagonais é outra preocupação importante nas treliças.
Diagonais muito abatidas desenvolvem grandes esforços.
Diagonais muito inclinadas aumentam muito o número de peças.
Recomenda-se que a inclinação fique entre 30° e 60°.

b. Materiais e seções

Como as barras das treliças estão sujeitas a esforços de tração e de compressão simples, devem ser usados materiais que apresentem boa resistência a esses dois esforços, como o aço e a madeira.
O aço apresenta duas vantagens em relação à madeira: maior facilidade de execução dos nós de ligação das barras e menor peso, já que é mais resistente aos dois tipos de esforços.
O concreto armado não é boa recomendação, já que nas barras tracionadas apenas a armação colabora, ficando o concreto como mero elemento de revestimento.
As seções das barras deverão ser escolhidas entre aquelas que respondam bem a esforços de tração e de compressão.
No aço, os cabos podem ser usados para as barras tracionadas; tubos, principalmente de seção circular, e cantoneiras são os mais adequados para barras tracionadas e comprimidas.
As seções de tubos circulares apresentam como desvantagem maior dificuldade na execução dos nós.
Na madeira, são usadas as seções quadradas e retangulares cheias, tanto para as barras tracionadas como para as comprimidas.

c. Aplicações e limites de utilização

A treliça, por apresentar em suas barras os dois esforços mais favoráveis, constitui um sistema estrutural muito econômico em termos de consumo de material, sendo, portanto, útil para vencer grandes vãos.
Por este motivo, a treliça é muito empregada em coberturas e pontes.
Seu uso pode ser interessante na sustentação de pisos com grandes vãos, em substituição às vigas de alma cheia, pois resultará em peças mais leves.

A forma da treliça normalmente utilizada para pisos, em substituição às vigas de alma cheia, é mostrada na figura ao lado.

Essa treliça recebe o nome de treliça de banzos paralelos.
As aberturas na alma da treliça permitem a passagem de tubulações, oferecendo também a possibilidade de ventilação e de iluminação.
Os limites de vãos utilizados nas treliças podem chegar a 120 metros, em coberturas - como nos hangares - ou ainda a 300 metros, em pontes.

d. Pré-dimensionamento de treliça

TRELIÇAS METÁLICAS

ALTURA EM METRO - d

7.5
6.0
4.5
3.0
1.5

VÃO EM METRO - L

0 9.0 18.0 27.0 36.0 45.0 54.0 63.0 72.0 81.0 90.0

d
L
d

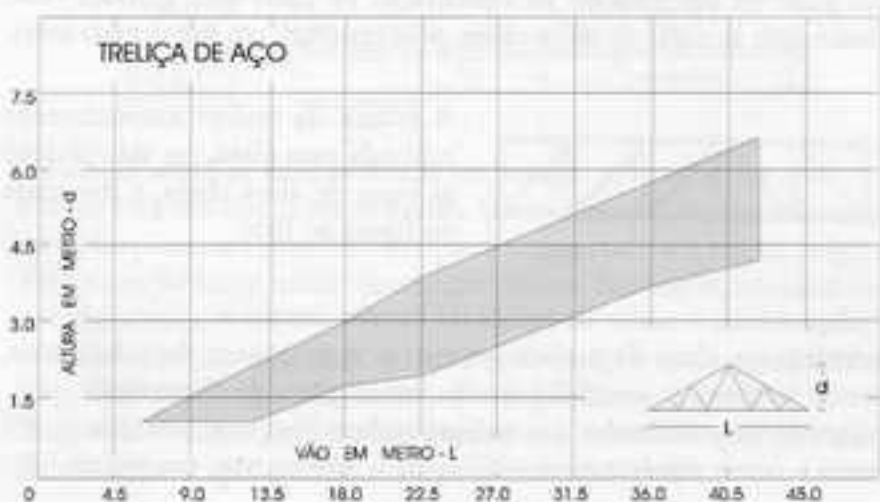
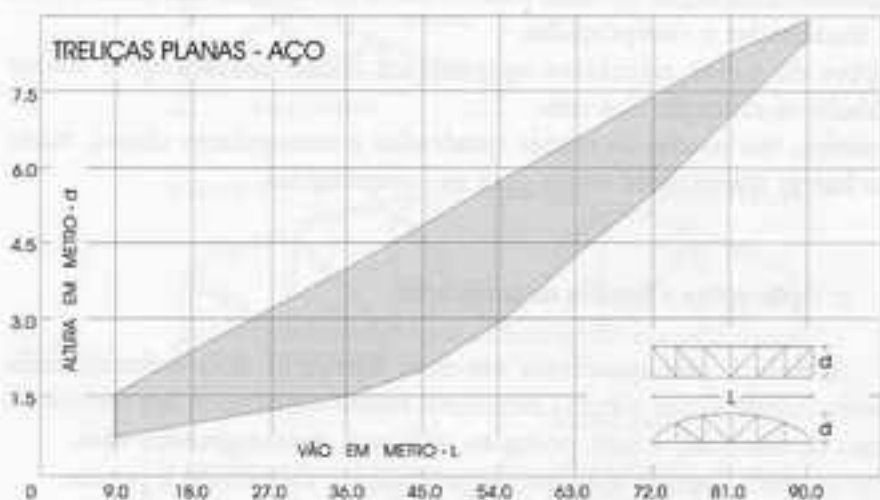
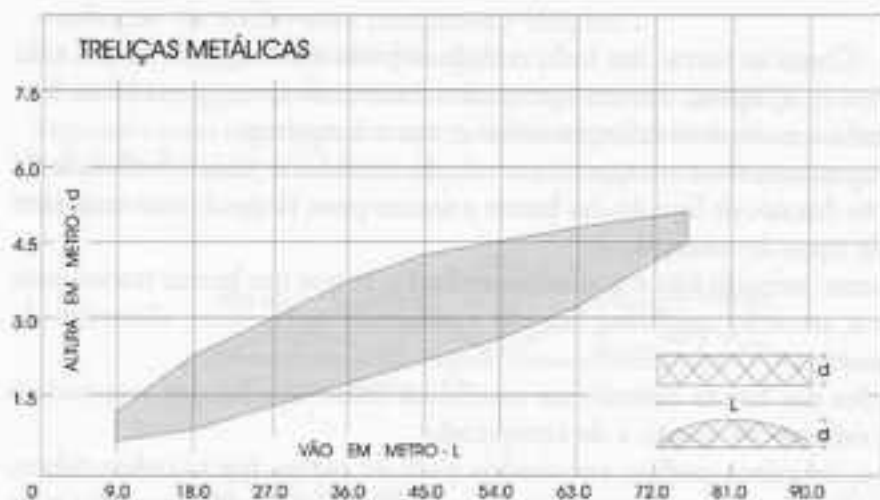
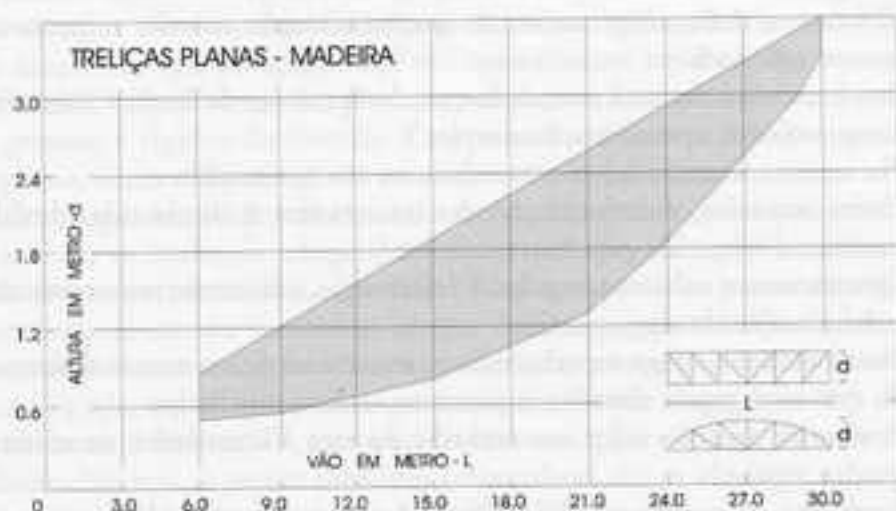
TRELIÇAS PLANAS - AÇO

ALTURA EM METRO - d

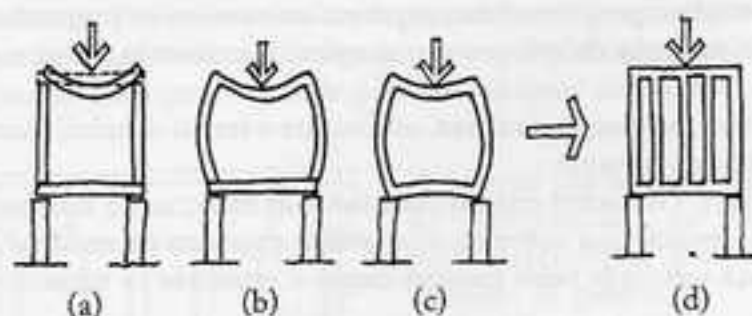
7.5
6.0
4.5
3.0
1.5

VÃO EM METRO - L

0 9.0 18.0 27.0 36.0 45.0 54.0 63.0 72.0 81.0 90.0

d
L
d

Viga Vierendeel

a. Comportamento

A viga Vierendeel, como a treliça, é um sistema estrutural formado por barras que se encontram em pontos denominados nós.
A semelhança entre os dois sistemas acaba aqui.
Para se entender o comportamento da viga Vierendeel, deve-se imaginar as situações representadas nos modelos da figura abaixo.

Na primeira situação (a), ao se aplicar a força sobre a estrutura, apenas a viga superior flexiona, não transmitindo qualquer esforço para as demais barras, pois todos os nós são articulados.
Os montantes verticais recebem apenas força de compressão simples.
Na segunda situação (b), por estarem as barras rigidamente ligadas aos nós superiores, a flexão da viga é parcialmente transmitida para os montantes.

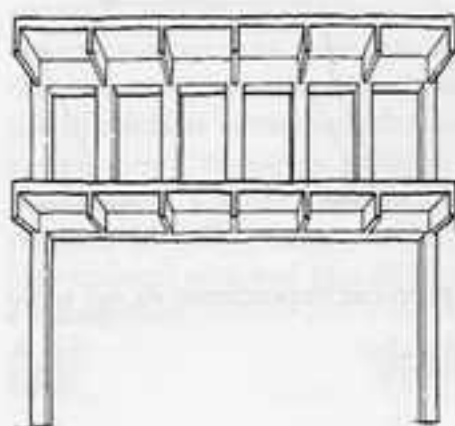
A viga, sofrendo restrição à sua deformação em razão da influência dos montantes, deforma-se menos do que na situação anterior e, portanto, é menos solicitada.
Sendo os nós inferiores articulados, nenhum esforço de flexão é transmitido à viga inferior, apenas tração simples.
Na terceira situação (c) os nós inferiores são enrijecidos.
Desta maneira, a deformação dos montantes é diminuída, devido à resistência oferecida pela barra inferior.
Os montantes, mais restringidos à deformação, oferecerão maior resistência à deformação da viga superior.
Nesta situação, a viga superior e os os montantes ficam menos deformados do que na segunda situação e, portanto, menos solicitados.
A terceira situação (c) é um embrião da viga Vierendeel e denomina-se quadro rígido.
Se dentro do quadro rígido criarmos novos montantes (d), teremos uma estrutura em que a influência de uma barra em outra provocará diminuição nas suas deformações e, em conseqüência, nos esforços atuantes, permitindo que esse conjunto possa receber um carregamento maior ou vencer um vão maior.
Este sistema estrutural denomina-se viga Vierendeel. Pode-se observar a diferença radical entre o comportamento da viga Vierendeel e o da treliça: na treliça, os nós devem ser articulados, daí as barras serem sempre organizadas em triângulos; a viga Vierendeel, para ser possível, necessita que os nós sejam rígidos, dispensando a formação triangular.
As barras horizontais da viga Vierendeel são denominadas membruras e as verticais, montantes.
É fácil perceber que a membrura superior, assim como os montantes, estão sujeitos a esforços de compressão simples, a momento fletor e a força cortante.
A membrura inferior, por sua vez, está sujeita a tração simples, a momento fletor e a força cortante.
Como a viga Vierendeel está sujeita a todos os esforços, do mais ao menos favorável, resulta uma estrutura com maior consumo de material do que uma treliça solicitada pelas mesmas cargas e vencendo os mesmos vãos.

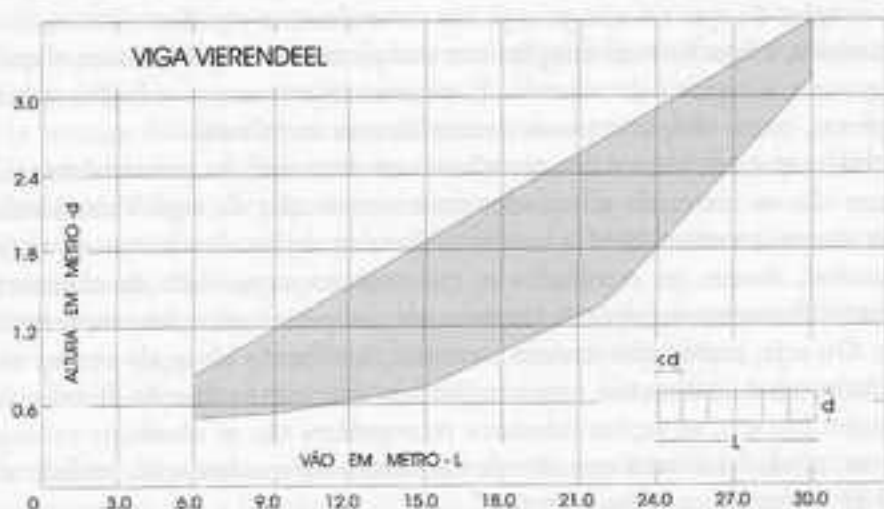
b. Materiais e secções usuais

A viga Vierendeel exige que seus nós sejam rígidos, logo, será mais interessante o uso de materiais que facilitam a execução de vínculos rígidos. O aço e o concreto armado moldado "in-loco" são apropriados.

No caso do aço, a soldagem entre peças é uma maneira fácil de executar esses vínculos. No concreto armado, os vínculos rígidos são de execução mais simples do que no aço, pois já são naturalmente rígidos.
Na madeira, a ligação mais simples entre as peças é feita por encaixe, o que não garante a rigidez do vínculo. É necessário recorrer a soluções mais complexas, como chapas e pinos de madeira ou metálicos.
Conclui-se que, em termos de execução, o concreto armado, principalmente, e o aço são os materiais adequados para a execução da viga Vierendeel, sendo menos recomendável a madeira. Para as seções das barras da viga Vierendeel, devem ser escolhidas as que tenham capacidade de absorver concomitantemente esforços de tração ou de compressão simples e momento fletor. Ou seja, seções que tenham material distribuído longe do centro de gravidade, em duas direções, e com maior concentração na direção do esforço de flexão. No aço, as seções tubulares retangulares são as ideais.
Pode-se, ainda, por uma questão de facilidade de manutenção, utilizar o perfil H e, em último caso, a seção I.
No concreto armado, as seções retangulares, por sua facilidade de execução, são as indicadas.
A execução das barras de uma viga Vierendeel de concreto armado exige um trabalho de fôrma extremamente difícil. Por isso, quando não houver outro impedimento - manutenção e disponibilidade de material, por exemplo - dar-se-á preferência ao uso do aço.

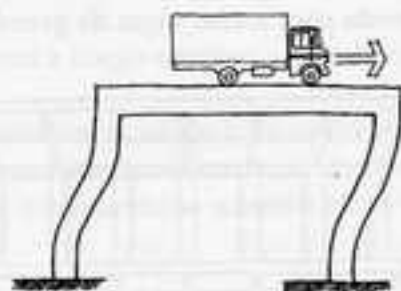
c. Aplicações e limites de utilização

A viga Vierendeel é utilizada quando se exige grandes vazios na alma, para passagem de tubulações ou de ventilação e de iluminação, ou ainda para tornar vigas de grande porte visualmente mais leves.

Podem ser usadas para sustentação de coberturas, de pisos e, particularmente, em vigas de transição de pilares.
Os limites de utilização da viga Vierendeel são os mesmos das vigas de alma cheia.
Obs: Vigas de transição são vigas que apoiam pilares distribuindo suas cargas para outros pilares em posições diferentes.

d. Pré dimensionamento da viga Vierendeel

O Pilar

a. Comportamento

O pilar é peça fundamental na concepção estrutural.
Seu posicionamento e sua forma são determinantes na concepção arquitetônica. Sua influência nos espaços é bastante sensível.
O pilar quando submetido a cargas verticais sofre apenas compressão simples.

Em situações especiais, quando sujeito a cargas horizontais devidas ao vento ou à frenagem de veículos, além da compressão simples, o pilar passa a receber esforço de flexão.

A compressão simples nos pilares pode provocar, dependendo da sua seção e comprimento, o efeito da flambagem.
Como já visto, esta sempre ocorrerá na direção de menor rigidez ou menos travada do pilar.

b. Materiais e seções usuais

Qualquer material que trabalhe bem a compressão simples pode ser utilizado nos pilares. Em princípio, o aço seria o mais indicado por ser, entre os três materiais estudados neste trabalho, o mais resistente à compressão. Entretanto, essa virtude pode tornar-se um defeito.
As seções de aço são esbeltas e, portanto, mais suscetíveis à flambagem, o que pode ser contornado com seções mais robustas, ou maior quantidade de travamento, conduzindo à elevação do custo da estrutura.
O pilar de concreto armado apresenta, em termos de área de projeção, um valor 50 % maior do que o correspondente de aço, mas um custo bem inferior, da ordem de 1/3 do aço.
Portanto, a escolha entre trabalhar com pilar de concreto armado ou de aço depende dos espaços disponíveis e dos custos.
Para menores áreas de projeção dos pilares usa-se o aço; para menores custos, o concreto armado.
Outro fator já discutido e que não deve ser esquecido é o da velocidade de execução; neste caso, a escolha do aço é fundamental.
A madeira apresenta uma área de projeção aproximadamente 70% maior do que a de concreto, com um custo 50 % superior.
A opção por um pilar de madeira depende normalmente de fatores estéticos.
As seções de pilares submetidos a compressão simples deverão ter distribuição de material igualmente espaçada em relação ao seu centro de gravidade.
No aço, seções tubulares circulares seriam as ideais, mas apresentam contra si a maior dificuldade de execução de vínculos com os outros elementos estruturais.
As seções tubulares quadradas e, em último caso, as retangulares apresentam maior facilidade na execução dos vínculos.
Quando o fator manutenção for decisivo, deve ser utilizado o perfil H, que apresenta razoável equivalência de rigidez nas duas direções.
No concreto armado, as seções não podem ser vazadas, por problemas de ordem construtiva; as seções circulares continuam sendo as ideais, apesar das dificuldades na execução das fôrmas; são mais usuais as seções quadradas e, com menos vantagens, as seções retangulares.
Na madeira, a seção circular é naturalmente encontrada nos troncos, portanto de fácil obtenção, mas como o mercado não trabalha de maneira convencional com esse tipo de bitola, são mais usadas as seções quadradas e retangulares.
A seção H pode ser obtida pela composição de peças, o que acarreta maior emprego de mão-de-obra.

c. Aplicações e limites de utilização

Quanto à aplicação dos pilares, não há muito o que falar, a não ser reforçar a idéia de que uma distribuição adequada, com espaçamentos dentro de certos limites, conduz a soluções mais econômicas no conjunto estrutural.
No aço e no concreto, os espaçamentos entre 4 e 6 metros são os ideais, desde que possíveis segundo o projeto arquitetônico.
Na madeira, esse espaçamento fica entre 3 e 4 metros.
Os limites em termos de altura livre são dados pela possibilidade construtiva e pela relação entre seu comprimento e secção.
Os pilares de aço e de concreto permitem maiores comprimentos, sem grandes dificuldades construtivas.
A madeira, por ser fornecida em barras com comprimentos não muito generosos, exige emendas nem sempre fáceis de ser executadas.

d. Pré-dimensionamento de pilar

PILARES METÁLICOS
(andar único)

LARGURA EM CM - d

70
60
50
40
30
20
10
0

d

ALTURA NÃO TRAVADA EM METRO - H

1.5 3.0 4.5 6.0 7.5 9.0 10.5 12.0 13.5 15.0

PILARES DE MADEIRA
(vários andares)

ESPESSURA EM CM - d

35 30 25 20 15 10 5 0

NÚMERO DE ANDARES APOIADOS - N

0 1 2 3 4 5

d

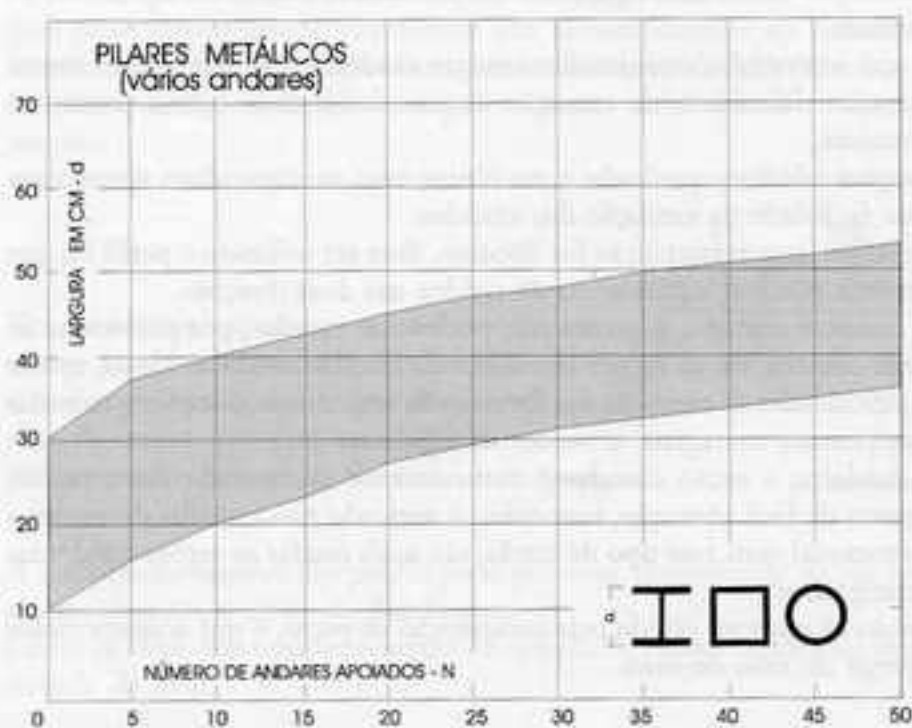
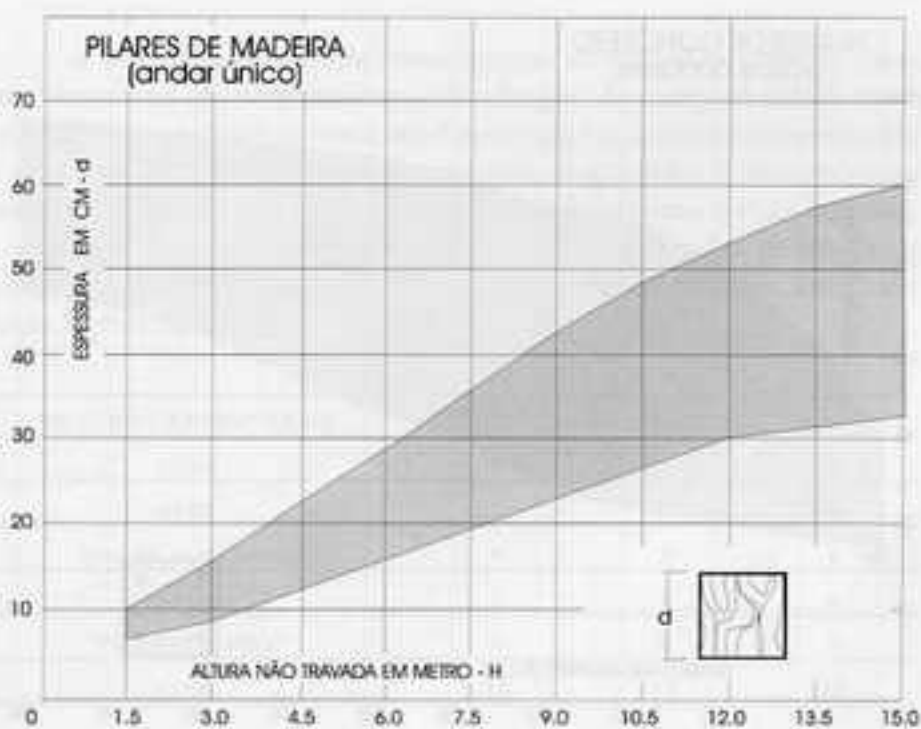
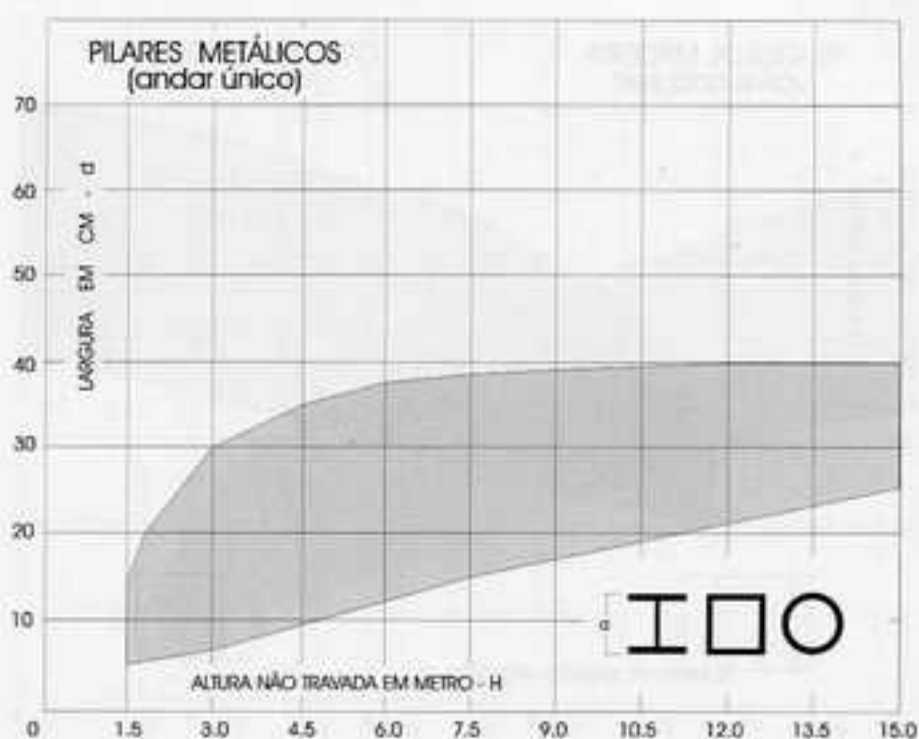
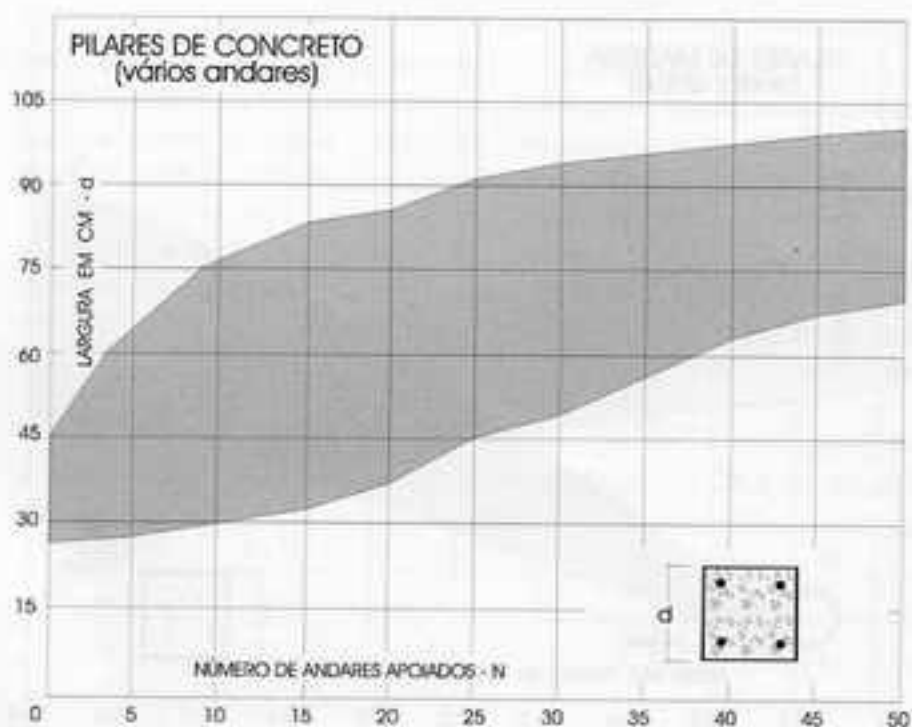
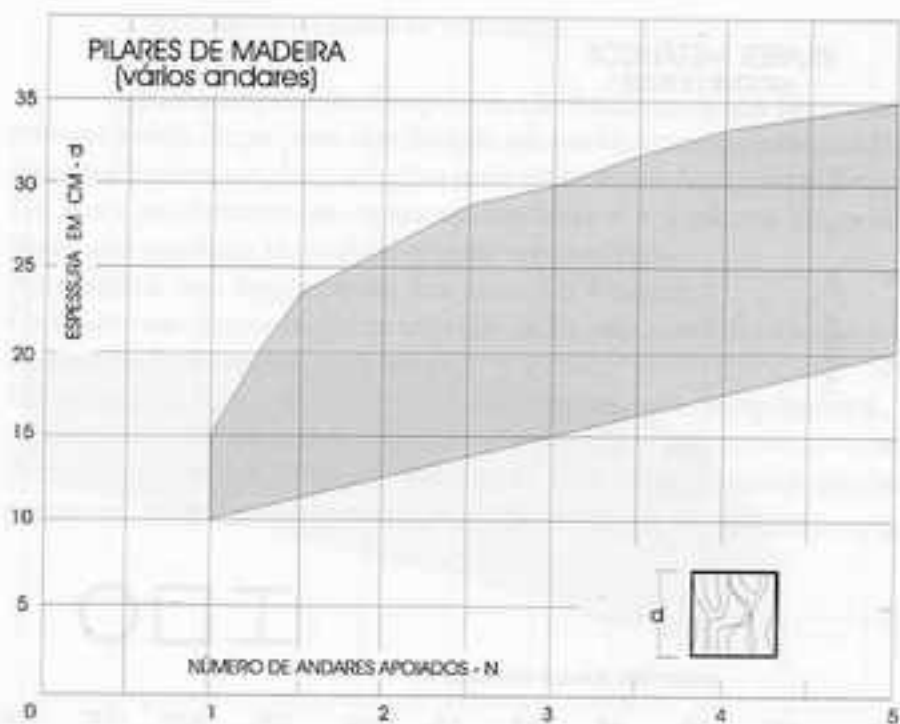
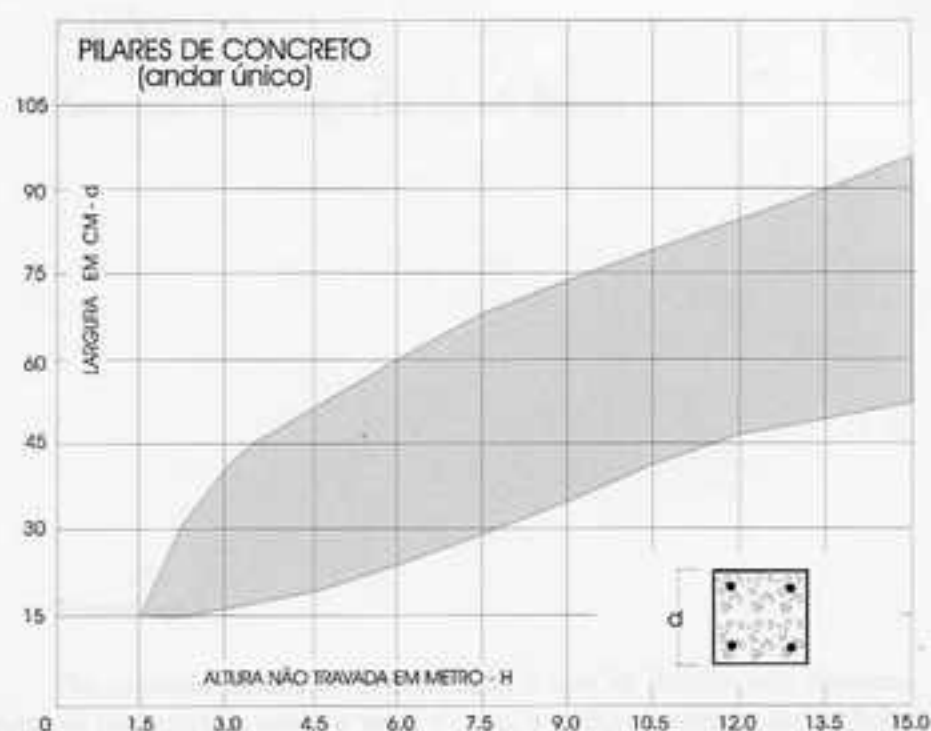



Tabela de avaliação da relação entre os sistemas estruturais e os materiais

A tabela foi construída como resumo da discussão efetuada neste item. Tem como objetivo facilitar a visualização da compatibilidade entre os sistemas estruturais e os materiais disponíveis - o aço, o concreto armado e a madeira. A tabela mostra, em princípio, o aço como o material mais versátil, seguido pelo concreto armado, e a madeira como o mais limitado. As notas de 1 a 5 têm os mesmos significados das usadas na tabela de avaliação de escolha de material. Valem as mesmas observações anteriores quanto à pontuação pessoal usada na construção da tabela.

SISTEMAS ESTRUTURAIS	AÇO	CONCRETO	MADEIRA
CABO	5	1	1
ARCO	4	4	4
VIGA DE ALMA CHEIA	4	4	3
TRELIÇA	5	2	4
VIGA VERENDEEL	4	4	2
TOTAL	22	15	14

CAPÍTULO 3

Associação de Sistemas Estruturais Básicos

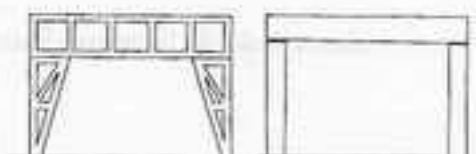
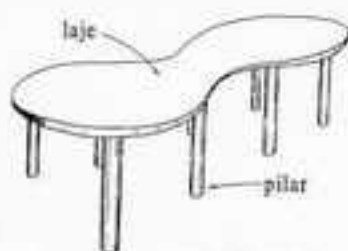
Introdução

No capítulo anterior, foi analisado o que se denominou sistemas estruturais básicos, tais como o arco, o cabo, a treliça, a viga de alma cheia, a viga Vierendeel e o pilar. Esses sistemas, na verdade, não ocorrem isoladamente nas estruturas, eles sozinhos não constituem uma estrutura completa. É óbvio que uma viga, seja de alma cheia, em forma de treliça ou Vierendeel, para constituir uma estrutura, necessita de pelo menos um pilar. Isso por si só é uma associação, mínima é verdade, mas é uma associação necessária para que se constitua uma estrutura completa. Por sua vez, o pilar sozinho, também, não constitui uma estrutura completa; logo, deixa de ter sentido. É a associação adequada dos sistemas estruturais básicos, em quantidade, forma e processo, que dá sentido à estrutura e, em conseqüência, à arquitetura. Essas associações ocorrem como resultado natural da concepção arquitetônica: das funções, dos espaços e intenções formais. A criação de linhas e planos que se harmonizam na criação das formas arquitetônicas e que se integram ao meio em que se inserem, está intimamente ligada às possibilidades de associações entre os sistemas estruturais básicos.

Os processos de associação de sistemas estruturais básicos são dois: processo de associação discreta e processo de associação contínua. A associação discreta ocorre quando os sistemas estruturais básicos se inter-relacionam originando um novo sistema, formado por barras e no qual se pode distinguir e até separar os sistemas básicos.

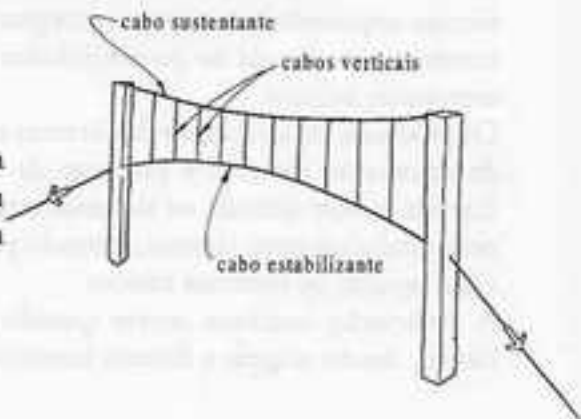
A associação contínua ocorre quando se repete infinitamente o sistema básico, dando origem a formas contínuas como as lâminas.

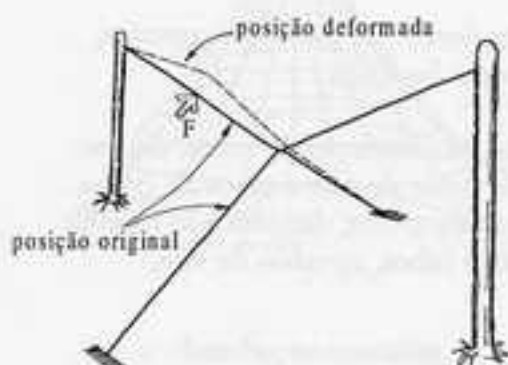
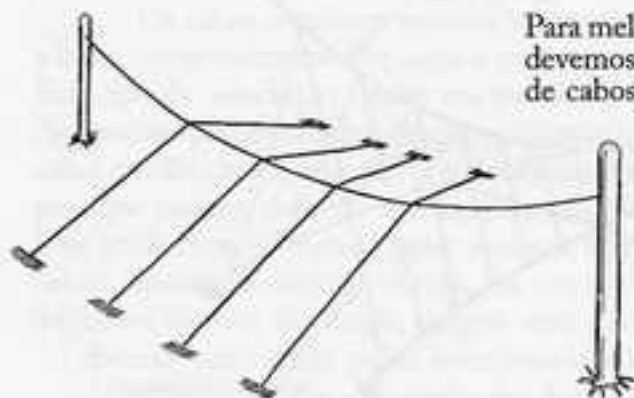
As figuras abaixo mostram exemplos de cada processo de associação.

Os dois primeiros exemplos se referem à associação discreta e os dois outros à associação contínua.

Nos dois últimos, a associação contínua de cabos resulta em uma membrana e a de vigas em laje; ambas, como se sabe, constituem geometricamente as lâminas.

Associação cabo x cabo

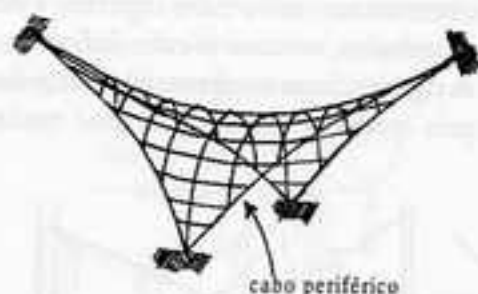
Associação discreta

Como já foi visto, o cabo é um sistema básico que graças à sua grande flexibilidade adquire, para cada tipo de carregamento, uma determinada forma. Isso implica a grande instabilidade dos cabos.
Viu-se, também, que para se enrijecer o cabo é necessário aplicar-lhe previamente uma determinada tensão.
Essa tensão pode ser aplicada por um pré esticamento do cabo ou por um determinado carregamento que o solicite de maneira que se mantenha rígido.
As associações cabo x cabo são normalmente utilizadas para dar aos cabos rigidez necessária para que possam manter a configuração desejada, qualquer que seja o carregamento.

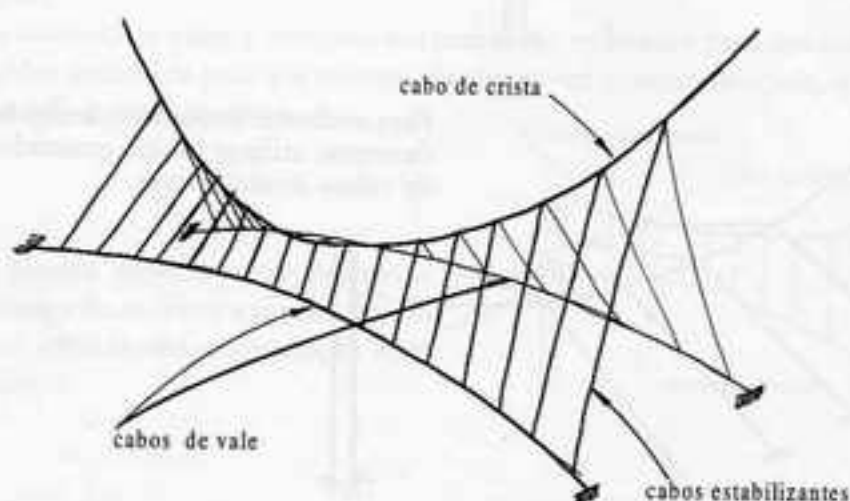
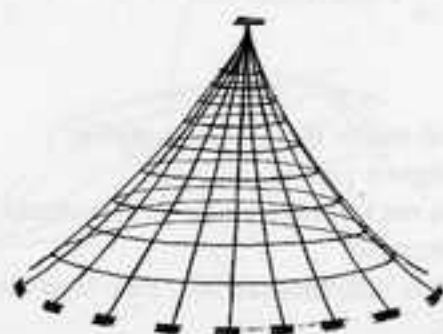
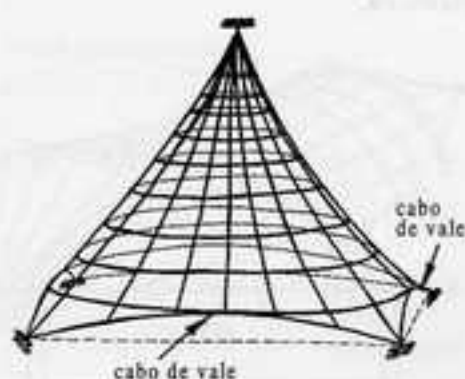
A figura mostra uma primeira maneira de se obter a rigidez de um cabo, utilizando a associação com outro.

O cabo superior é enrijecido por um cabo inferior ao qual é aplicada uma força de tração. Essa força é transmitida ao cabo superior por uma série de cabos verticais que ligam os dois. Assim, o cabo superior passa a ser tensionado, garantindo-lhe a rigidez necessária.
Denomina-se cabo sustentante àquele que recebe diretamente as cargas externas, no caso o cabo superior, e de cabo estabilizante àquele que enrijece o primeiro, no caso o cabo inferior.
A rigidez desse conjunto só ocorre no plano em que se encontram os cabos, pois qualquer força transversal tende a deslocá-los com facilidade.

A figura mostra uma maneira de enrijecer o cabo portante em duas direções.
Para isso, basta que um cabo estabilizante cruze ortogonalmente o cabo sustentante, de forma que este seja fixado em pontos altos e o estabilizante em pontos baixos.

O enrijecimento dado ao cabo sustentante por um único cabo não é perfeito.
A aplicação de uma carga fora do ponto de cruzamento pode provocar, ainda, grande deformação.,

Para melhorar a condição de rigidez, devemos utilizar maior quantidade de cabos estabilizantes.

Por uma questão de espaço, pode-se evitar que cada cabo estabilizante tenha seu ponto de fixação junto ao solo, utilizando para isso um cabo periférico que os fixará. Para criar rigidez nos cabos estabilizantes, na direção ortogonal aos seus planos, é usado um segundo conjunto de cabos que se tornam estabilizantes dos estabilizantes.

Note-se que, com isso, cria-se uma superfície em forma de sela de cavalo; essa é uma das formas fundamentais da associação cabo x cabo e apresenta rigidez em todas as direções.

Da observação da figura acima pode-se tirar alguns critérios para obtenção de condições mínimas de associação cabo x cabo:

a) Deve haver no mínimo quatro pontos de fixação;
b) O conjunto de cabos deve manter a ortogonalidade da malha, condição fundamental;
c) Os cabos sustentantes e estabilizantes devem ter curvaturas opostas;
d) Os cabos periféricos deverão ter a forma funicular.

Uma segunda possibilidade de utilização da associação de cabos, derivada dessa condição mínima, é a utilização de cabos de vale e cabos de cristas. Neste caso, os cabos estabilizantes do cabo superior, denominado cabo de crista, são fixados inferiormente em outros cabos, os cabos de vale.

Nesta associação, os cabos de cristas são os que suportam as cargas gravitacionais e os cabos de vale, as cargas de sucção de vento.
Notar que as condições mínimas são satisfeitas: ortogonalidade e curvaturas opostas entre os cabos sustentantes e estabilizantes.
Curvaturas opostas ocorrem também com os cabos de crista e de vale.

Uma terceira possibilidade é a distribuição radial dos cabos portantes, de forma que o centro seja mais alto do que as extremidades. Esses cabos são estabilizados por cabos anelares.

As condições mínimas são satisfeitas. Essa solução, apesar de radial, pode cobrir espaços quadrados, bastando para isso que os cabos radiais sejam fixados inferiormente em um cabo de vale

Associação contínua

Os cabos permitem associações contínuas, pela sua colocação lado a lado, ortogonalmente dispostos e com espaçamento muito pequeno.
Esse tipo de associação resulta nas membranas.
As membranas apresentam intrinsecamente as mesmas propriedades dos cabos que lhe deram origem. As membranas, portanto, devem ser enrijecidas para que possam absorver as mais diversas possibilidades de cargas.
Esse enrijecimento é dado pelas mesmas regras que regem as malhas de cabos, discutidas anteriormente. As membranas, para serem rígidas e definirem formas, vão exigir, sempre, uma associação discreta de cabos.
As formas adquiridas pelas membranas não são aleatórias e devem invariavelmente refletir o funicular das forças que atuam no seu plano.

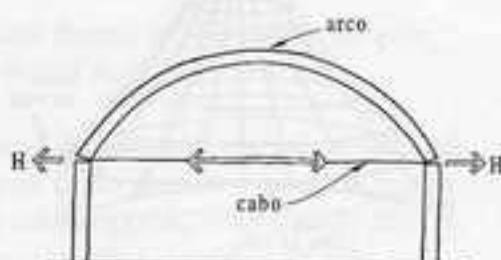
Caso contrário, as membranas enrugarão, como resultado do aparecimento de flexão As membranas, além de funcionarem estruturalmente regidas pelas leis de associação de cabos, servem também como elementos de vedação para as malhas discretas de cabos.
As membranas mais utilizadas são as de tecidos de PVC, de Teflon ou de Silicone, aos quais podem ser adicionados poliéster e fibras de vidro.

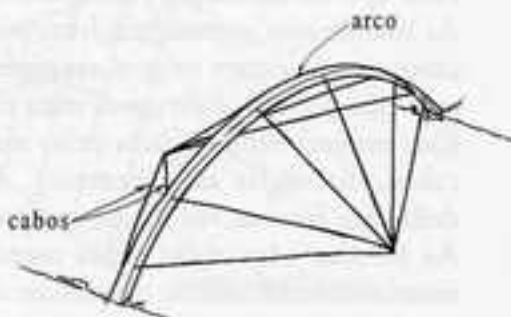
Observações gerais

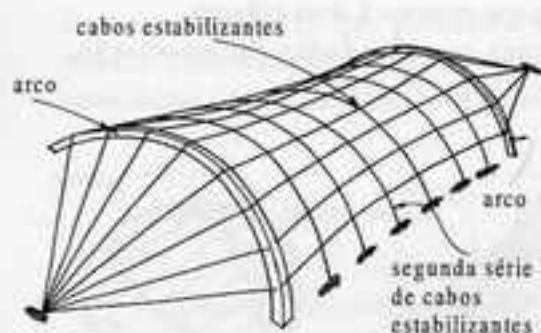
a) qualquer associação cabo x cabo só vai existir quando se juntarem a ela outros elementos básicos, como arcos, vigas e pilares;
b) a associação cabo x cabo resulta sempre em formas dotadas de curvaturas, sendo seu uso indicado apenas para coberturas;
c) graças à grande capacidade dos cabos de vencer vãos, esse tipo de associação é indicada para grandes vãos;
d) é a associação que apresenta as maiores possibilidades de formas livres;
e) os materiais usados são o aço e os plásticos.

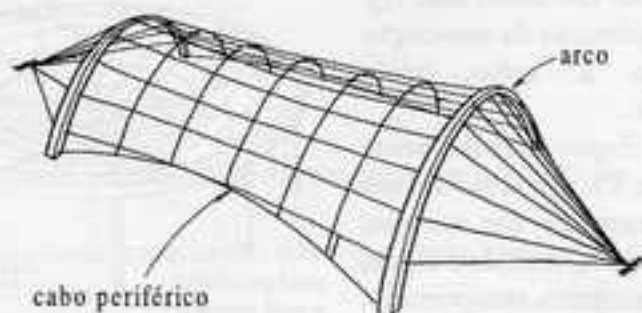
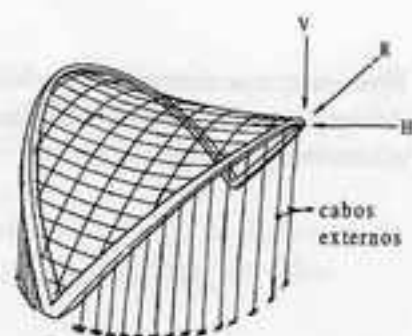
Associação cabo x arco

Associação discreta

A mais simples associação cabo x arco é a usada para absorver os empuxos dos arcos nos seus apoios.

Outras associações, mais sofisticadas, são as que utilizam o arco para fixar as extremidades dos cabos, em substituição aos cabos de cristas e de vales. Obviamente, as soluções formais serão muito diferentes, já que as curvaturas dos arcos serão opostas às dos cabos de crista.

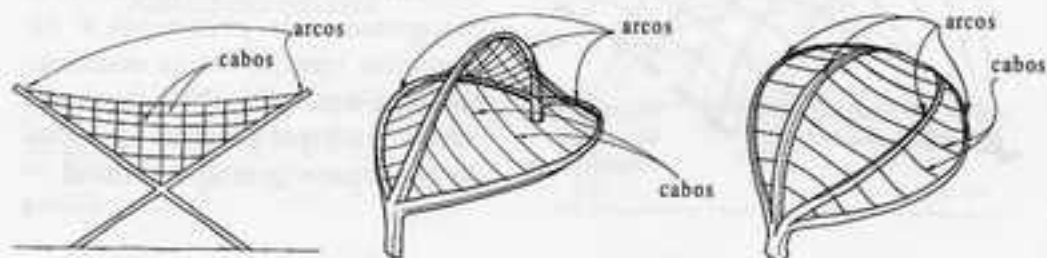
A figura mostra a associação mais simples entre malhas de cabos e arcos.
Um único arco é travado, no seu plano transversal, por um conjunto de cabos, que podem ou não convergir para um mesmo ponto.

Note-se que se mantém a condição mínima necessária de 4 pontos de fixação do conjunto. Essa associação é muito pobre, resultando em espaços internos muito exíguos.

Para aumentar o espaço interno, pode-se usar dois arcos dispostos paralelamente. Para a estabilização desses arcos, cria-se um conjunto de cabos transversais que se apoiam nos arcos e convergem para um único ponto em suas extremidades.
Os arcos permanecem estabilizados; no entanto, qualquer carga sobre os cabos irá deformá-los seriamente, prejudicando a sua utilização.

Para enrijecê-los, aplica-se o mesmo raciocínio usado na associação de cabos: cria-se um conjunto de cabos estabilizantes, ortogonais aos primeiros e de curvatura oposta. Dessa maneira, obtemos uma primeira associação cabo x arco, que permite a criação de um espaço bem aproveitável.

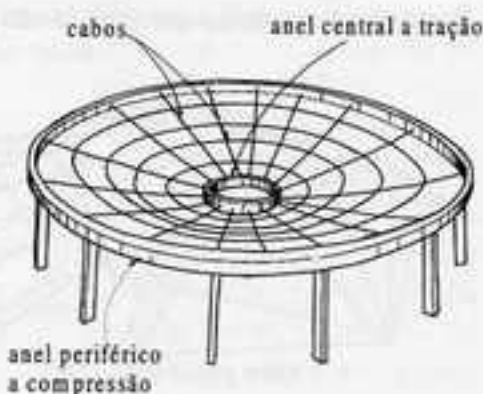
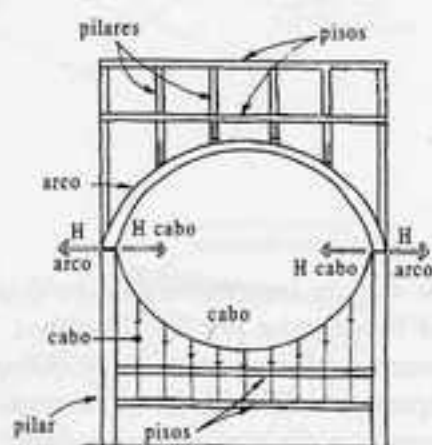
Os cabos estabilizantes podem ser fixados no chão ou em outro cabo, como mostra a figura abaixo.
Esta solução permite um grande vão aberto entre os arcos.

As posições relativas entre os arcos podem ser as mais diversas, como a solução apresentada na figura ao lado. Neste caso, os arcos não estão paralelos. Sua inclinação deve ser tal que a resultante das forças aplicadas pelos cabos sobre ele encontre-se no seu plano.

Note-se aí que os arcos fazem o papel dos cabos periféricos da associação em forma de sela, com um comportamento inverso, ou seja trabalhando a compressão.

É importante notar que devemos dar ao arco a forma mais próxima do funicular das forças aplicadas pelos cabos, para que predomine o esforço de compressão.

A grande vantagem dessa solução é que os cabos externos ficam contidos no plano vertical, não ocupando o espaço externo à área coberta.

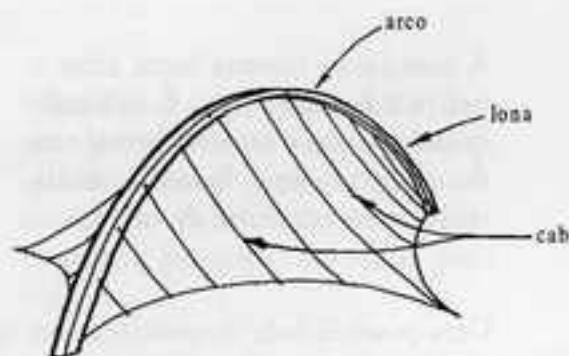
As ilustrações abaixo mostram outras possibilidades de associação, mantendo-se os mesmos princípios.

Um caso particular é apresentado na figura ao lado. Os dois arcos são substituídos por um único anel.

Este é uma derivação da associação radial cabo x cabo, vista anteriormente.

Os cabos são dispostos radialmente e anelarmente. Os cabos radiais são fixados internamente em um anel central, tracionado, e externamente, em um anel periférico, comprimido.

Esse sistema apresenta a vantagem de resolver os empuxos do cabo em si mesmo, não necessitando de cabos fixados no chão.
Tem como desvantagem a dificuldade de recolhimento das águas pluviais.

Uma associação muito interessante é a que usa arcos e cabos, de forma que um equilibre o empuxo do outro.
A figura mostra essa associação. Parte das cargas é absorvida pelo arco superior e parte pelo cabo inferior.
Note-se que os empuxos são equilibrados, transmitindo para os pilares apenas cargas verticais.

Esta é uma solução que permite a utilização da associação cabo x arco para a sustentação de pisos, ampliando o aproveitamento dessa associação para outras aplicações além das coberturas.

Associação contínua

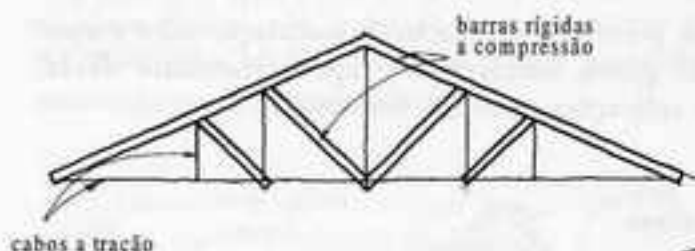
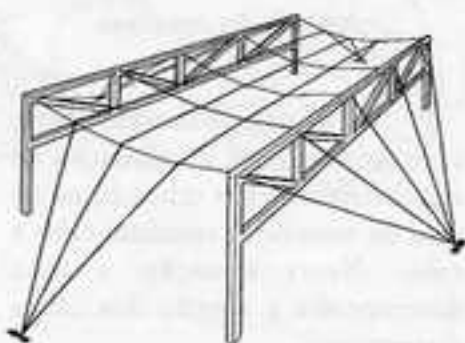
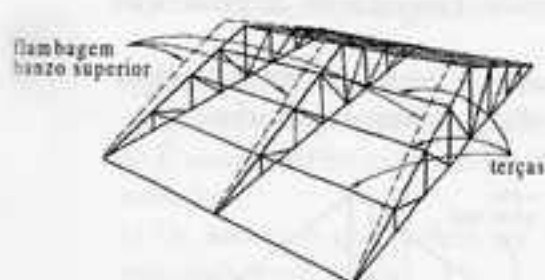
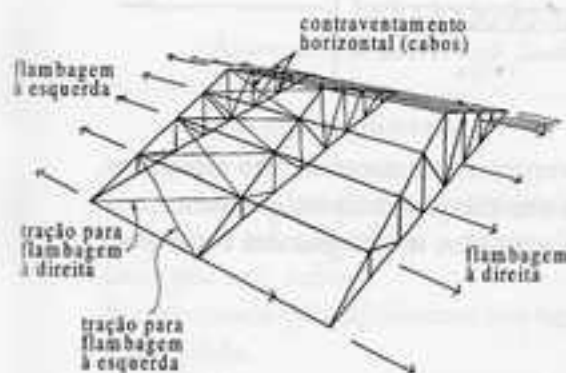
A associação contínua, neste caso, ocorre com a colocação de membranas entre os cabos, como no caso da associação contínua cabo x cabo. Nesta situação, a lona desempenha a função dos cabos sustentantes.
Valem todas as observações feitas para a associação cabo x cabo.

Observações gerais

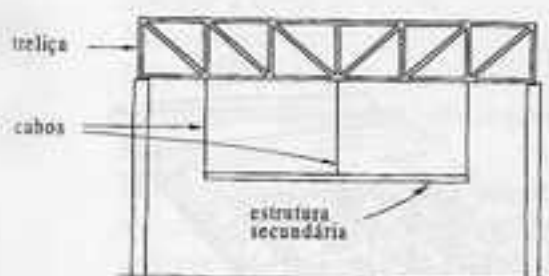
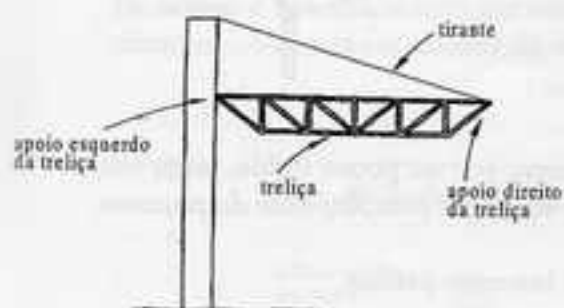
a) Essa associação é utilizada freqüentemente para coberturas, já que resulta em formas curvas;
b) Devido à grande capacidade dos cabos, essa associação deve ser usada para grandes vãos;

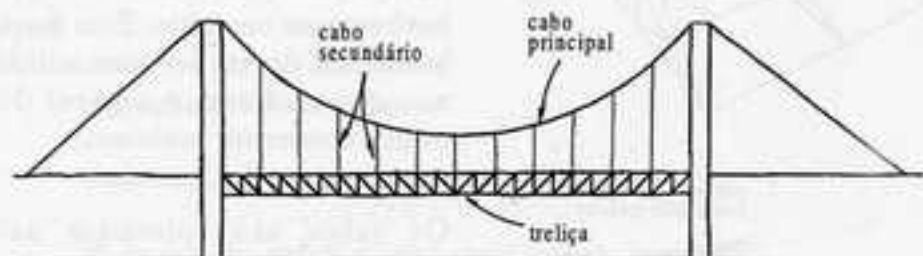
c) Esse tipo de associação não apresenta variedade de formas tão grande quanto a associação cabo x cabo;
d) Podem ser usados materiais como aço, concreto e madeira, sendo o primeiro o mais indicado, por ser mais leve e versátil e, portanto, mais coerente com o tipo de associação.

Associação cabo x treliça

Associação discreta

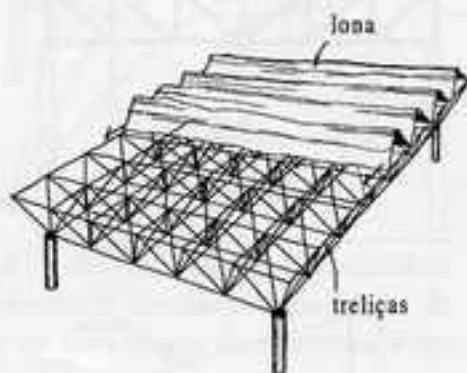
A associação treliça x cabo pode ocorrer internamente à própria treliça, as barras tracionadas podendo ser substituídas por simples cabos. Essa solução, apesar de representar economia de material e de propiciar um resultado estético interessante, pode apresentar dificuldades na execução dos detalhes de ligação entre as barras comprimidas e o cabo tracionado.

A associação externa entre cabo e treliça é bastante rara. É utilizada quando se visa o aspecto formal e se deseja dar um desenho mais retilíneo às estruturas de cabos.

Uma possibilidade de associação em que o cabo é um elemento secundário ocorre nos contraventamentos das coberturas metálicas compostas de treliças. Sabemos que o banzo superior de uma treliça de cobertura sofre compressão simples.
Dependendo do comprimento da barra, sem travamento, é possível a ocorrência de flambagem no plano ortogonal ao plano da treliça, já que é nesse plano que o banzo superior encontra-se menos travado.
As terças, vigas que apoiam as telhas e transmitem as cargas para as treliças, são responsáveis pelo travamento do seu banzo superior, no plano ortogonal.

No entanto, se uma das treliças flambar, a força horizontal resultante de seu deslocamento será transmitida a todas as demais treliças, provocando um tombamento em série. Essa força horizontal deverá ser transmitida aos apoios, e esse é o papel do contraventamento horizontal.

Os cabos são colocados nas diagonais dos retângulos formados pelas treliças e pelas terças. Juntamente com o banzo superior da treliça e as terças, os cabos formam uma treliça horizontal de banzos paralelos que transmite as cargas horizontais de flambagem para os apoios.

Como nunca se pode prever para que lado o banzo superior da treliça irá flambar e para que os cabos dos contraventamentos trabalhem sempre à tração, eles são dispostos em duas direções, resultando na forma em X.

Uma outra possibilidade de associação cabo x treliça ocorre quando se deseja pendurar qualquer estrutura secundária em uma estrutura principal formada por treliças.

Outra possibilidade de associação, inversa à anterior, ocorre quando a treliça é atirantada, servindo o tirante de apoio para ela.

Algumas pontes pênseis são exemplos muito interessantes de associação entre treliças e cabos.
Nestas pontes, o tabuleiro (piso da ponte) é composto de duas vigas longitudinais principais, compostas de treliças de banzos paralelos.

Essas treliças são apoiadas em cabos verticais covenientemente espaçados, Esses cabos, por seu turno, apoiam-se nos cabos principais que vencem os vãos. É uma solução muito econômica para vãos muito grandes e que pode ser adotada também em edifícios.

Associação Contínua

Essa associação ocorre quando uma treliça espacial, um tipo de associação contínua treliça x treliça que será vista mais adiante, é utilizada para suportar uma cobertura de lona.

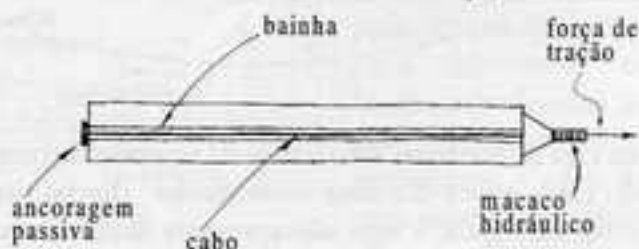
Neste caso, a lona é usada como substituta das telhas convencionais, não colaborando estruturalmente. Tal solução apresenta como vantagens menor peso da cobertura e maior rapidez de construção, já que a lona pode cobrir todo o espaço com uma peça só.

A desvantagem consiste no fato de a lona, por ser pouco rígida, exigir um esticamento prévio, o que pode resultar em maior complexidade do processo construtivo.
Essa associação não apresenta grande interesse prático

Observações gerais

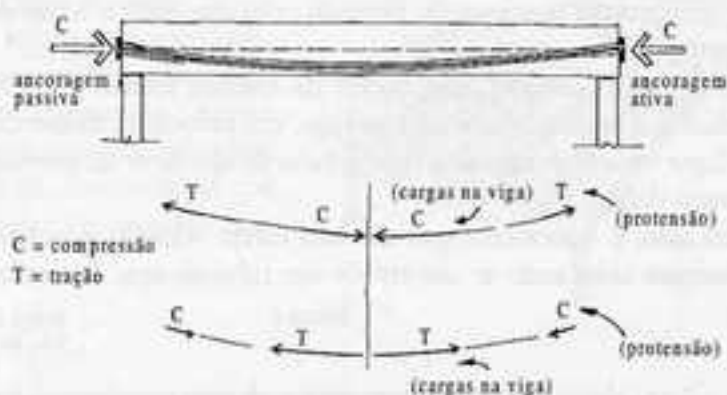
a) Esse tipo de associação apresenta uma gama enorme de aplicações, tanto para coberturas como para pisos;
b) É usada preferencialmente para grandes vãos, com grande economia de materiais;
c) Os materiais que podem ser usados nessa associação são a madeira e, principalmente, o aço.

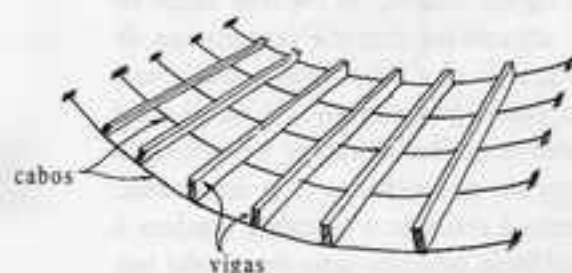
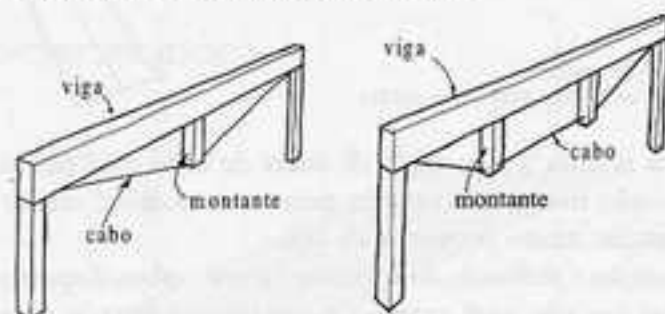
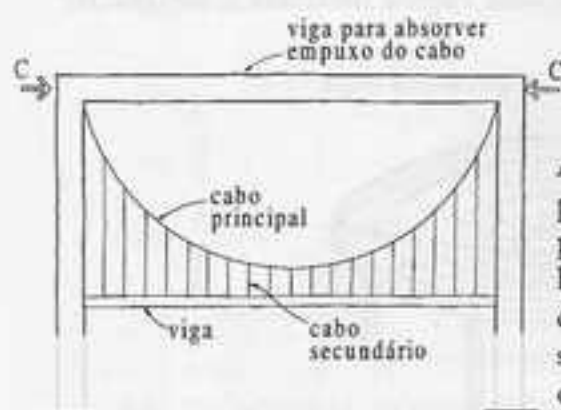
Associação cabo x viga de alma cheia

Associação discreta

Esse tipo de associação pode ocorrer internamente, ou seja, a viga pode ter a sua resistência aumentada pela aplicação de uma força externa, dada por um cabo.
É encontrada principalmente nas vigas de concreto, resultando no concreto protendido.
A protensão nas vigas de concreto é uma alternativa à armação convencional, de concreto armado. Sabe-se que o concreto é um material de elevada resistência à compressão e muito baixa à tração. Sabe-se, também, que, no concreto armado, a tração é absorvida pelo aço ligado ao concreto por aderência. No concreto armado, o trabalho do aço é passivo, ou seja, ele absorve a força de tração.
No concreto protendido, o aço apresenta um trabalho ativo.
Não é utilizado para absorver a força de tração, mas para aplicar uma força de compressão que a anule, fazendo com que toda a seção da viga trabalhe a compressão.
No concreto armado, não ocorre da mesma forma: grande parte da viga trabalha a tração, sendo essa porção, em princípio, desperdiçada. Para que aplique uma compressão à viga, o cabo de aço deve ser previamente esticado dentro dela.
Para isso, é necessário que ele não esteja aderido ao concreto, o que se consegue colocando-o dentro de um tubo de aço, denominado bainha.

Para conseguir o esticamento do cabo de aço, é necessário que uma das suas extremidades seja fixada à viga (ancoragem passiva) e a outra a um macaco hidráulico (ancoragem ativa) que, apoiado na outra extremidade da viga, possa proceder à tração do cabo. Quando a força aplicada ao aço é igual à necessária, determinada pelo cálculo, o cabo é então fixado na viga (ancoragem ativa). O cabo esticado tende a voltar à sua dimensão inicial, provocando, em conseqüência, uma compressão no concreto.

O cabo de protensão, para maior eficiência, pode ser colocado fora do centro de gravidade da seção da viga, de modo que, além da compressão simples, o cabo aplique um momento fletor contrário ao momento ao qual a viga está sujeita devido ao carregamento externo.

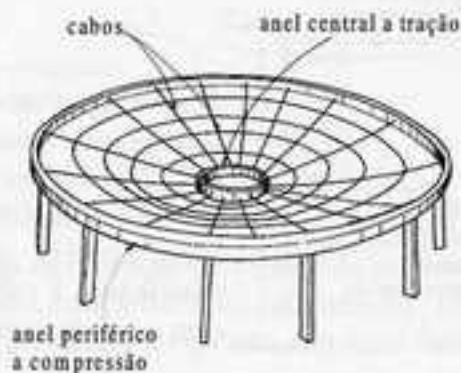
Como o momento fletor varia ao longo da viga, para que a protensão não inverta totalmente o seu comportamento original, provocando trações indesejáveis, a excentricidade do cabo também deve variar ao longo do comprimento da viga, de modo que o momento invertido provocado pela protensão seja proporcional ao momento original provocado pelo carregamento.

A protensão na viga de concreto, em virtude da inversão de comportamento provocada pelo cabo, aplica-lhe uma contraflecha (flecha para cima), de forma que, ao ser carregada, a viga não apresente flechas indesejadas.

Essa característica e a possibilidade de aproveitamento de toda a seção da viga a compressão fazem com que as seções de concreto protendido sejam em média 30 % menores do que as de concreto armado.
É importante salientar que o processo de protensão pode ocorrer também em vigas de aço e de madeira. Neste caso, a protensão é usada para diminuir as deformações, permitindo o uso de vigas mais esbeltas. Trata-se, no entanto, de solução raramente adotada. Outra associação entre cabos e vigas de alma cheia é a viga armada ou viga vagão, nome derivado do seu uso como elemento estrutural nos vagões de trem. Neste caso, o cabo é usado para sustentar a viga, diminuindo-lhe o vão. Com isso, pode-se vencer vãos maiores com menor dimensão de viga. Nesta associação, a viga se comporta como contínua, apoiada em montantes que se apoiam no cabo. O empuxo do cabo é absorvido pela própria viga.

A associação cabo x viga de alma cheia pode ocorrer, ainda, quando o peso da viga é utilizado para dar ao cabo maior estabilização às mudanças de forma.

A associação cabo x viga também pode ocorrer quando a viga é usada para absorver os esforços horizontais devidos ao cabo. Neste caso, tem-se uma associação semelhante à cabo x arco, só que com esforços contrários.

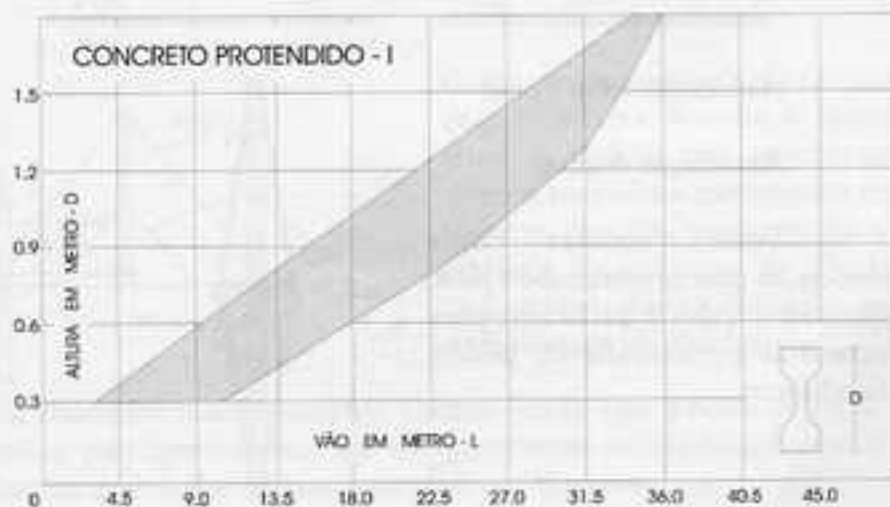
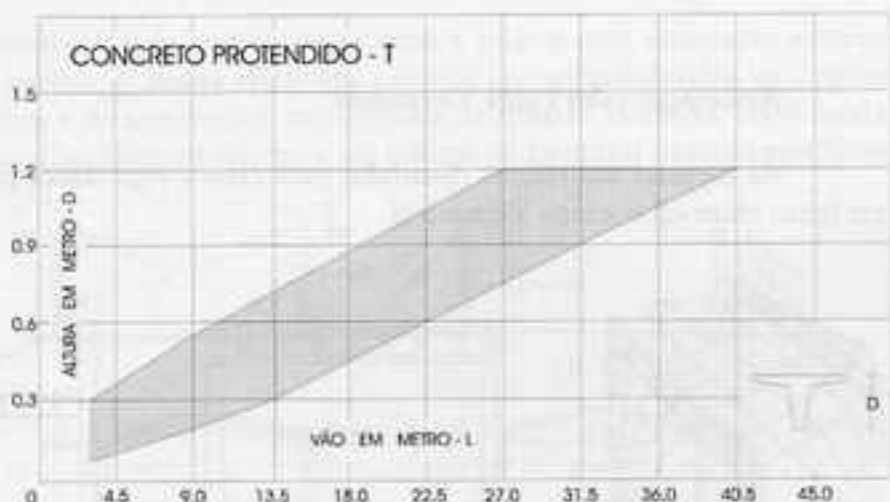
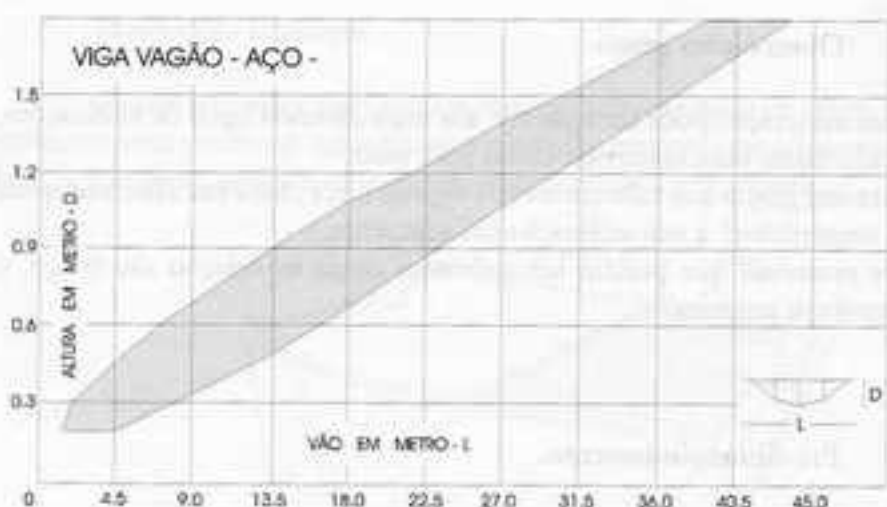
Associação contínua

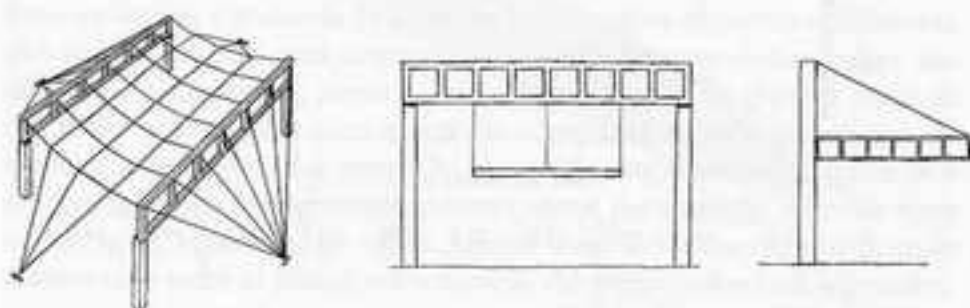
Como será visto mais adiante, a associação contínua de várias vigas extremamente próximas umas das outras resulta em uma placa denominada laje. A laje pode associar-se ao cabo, aumentando a sua rigidez.

Pode ainda ocorrer a associação de redes de cabo com placas de concreto. É uma solução muito interessante, pois torna possível vencer grandes vãos com espessuras muito pequenas de laje.

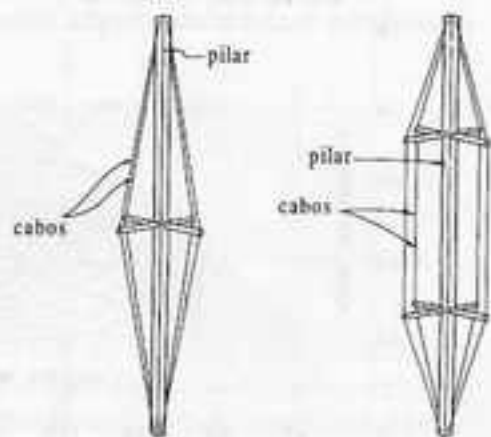
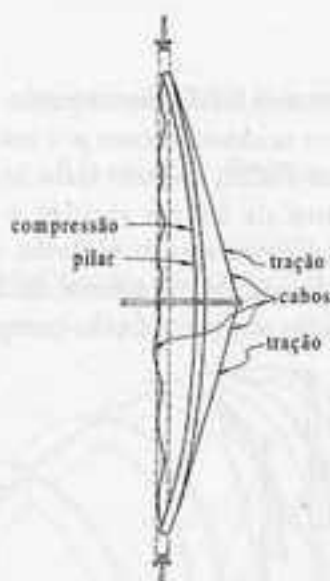
Essa associação é realizada da seguinte forma: cabos dispostos radialmente são fixados em um anel externo e em outro interno; outros cabos são colocados anelarmente, como visto na figura abaixo; os espaços entre os cabos são preenchidos com placas de argamassa armada (argamassa de cimento e areia, armadas com telas de aço de alta densidade); aplica-se a esse conjunto um carregamento externo, como, por exemplo, sacos de areia ou de água; com isso, os cabos sofrem uma deformação, provocando afastamento entre as placas; esses espaços são preenchidos com argamassa; após a cura da argamassa, o carregamento é retirado e os cabos tendem a voltar ao seu tamanho normal; essa tendência provoca uma protensão nas placas; o conjunto trabalha como uma cúpula invertida e totalmente comprimida.

Observações gerais

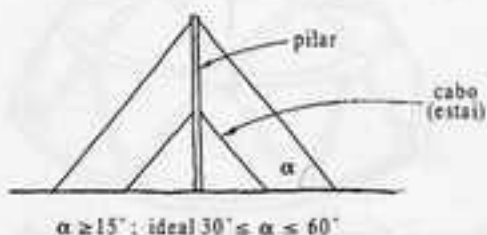
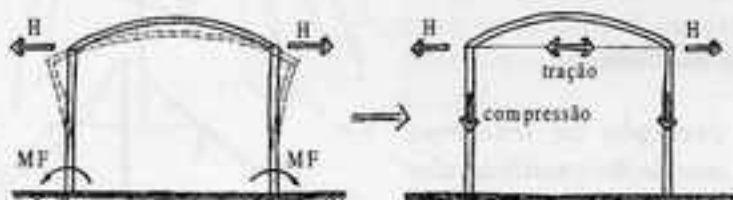
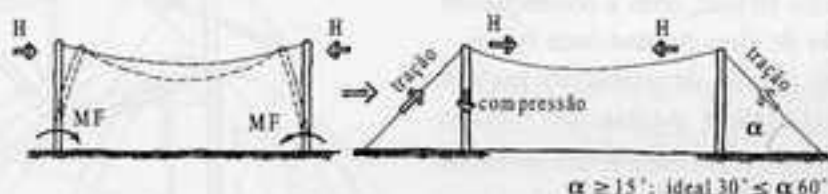
a) Essa associação pode ser aplicada aos mais diversos tipos de edificações, servindo tanto para cobertura como para piso;
b) Permite, graças aos cabos, o uso da viga de alma cheia em vãos, nos quais seria impraticável a sua utilização isoladamente;
c) Os materiais que podem ser aplicados nessa associação são o aço, o concreto e a madeira.

Pré-dimensionamento

Associação cabo x viga Vierendeel

As mesmas associações discutidas para cabo e viga treliça podem ser feitas entre cabo e viga Vierendeel.

Associação cabo x pilar

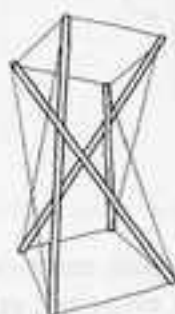
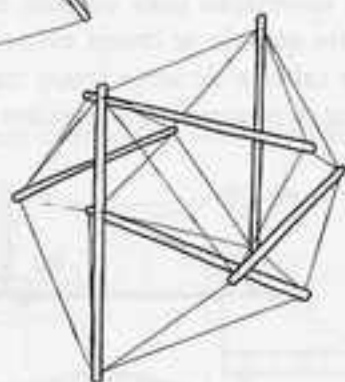
Associação discreta

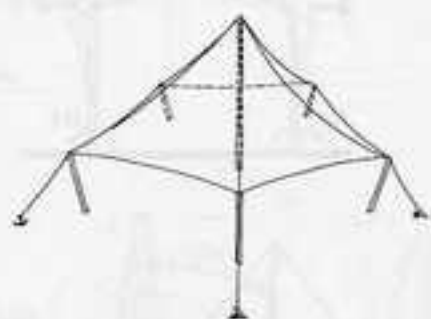
Pode ocorrer uma associação interna entre cabo e pilar, quando o cabo é utilizado para aumentar a resistência do pilar à flambagem.

A tendência ao giro do pilar provocada pela flambagem é absorvida por compressão, no pilar, e por tração, no cabo.
Quanto mais afastados os cabos estiverem do centro do pilar mais rígido será o conjunto.
Essa solução permite a utilização de pilares muito altos e esbeltos.

A associação mais comum entre cabo e pilar é uma associação externa, feita quando se deseja evitar que esforços horizontais devidos ao empuxo de cabos e de arcos sejam transmitidos aos pilares, evitando, desse modo, que os pilares fiquem sujeitos a um esforço desfavorável : o momento fletor.

Outra associação cabo x pilar ocorre quando pilares isolados e muito altos, como os que sustentam antenas, necessitam travamentos em todas as direções, para reduzir ao mínimo os esforços de flexão causados pelo vento e diminuir o seu comprimento de flambagem.

São os chamados pilares estaiados. O cabo recebe aqui o nome de estai. Os cabos, para apresentarem um comportamento satisfatório, devem ter inclinações dentro dos limites mostrados nas figuras acima.

Uma associação muito interessante deste tipo, mas infelizmente pouco usada, é o Tensegrity. Essa associação foi descoberta acidentalmente por um aluno do inventor e filósofo Richard Buckminster Füller, quando fazia móbiles. Basicamente, o tensegrity é um conjunto de barras rígidas e cabos convenientemente unidos, formando estruturas muito estáveis que se comportam em todo o tempo da mesma forma, independente da direção em que são solicitadas, ou seja, as barras rígidas sempre sofrerão compressão axial e os cabos, tração axial.

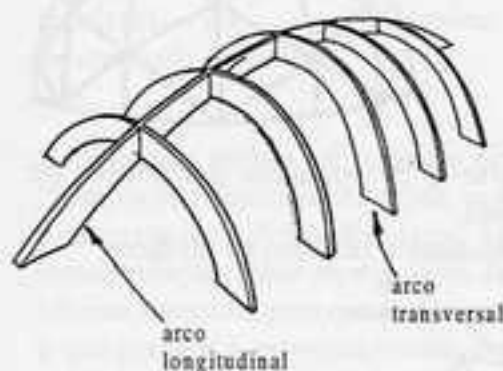
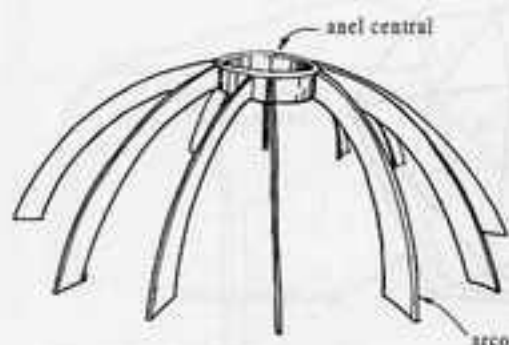
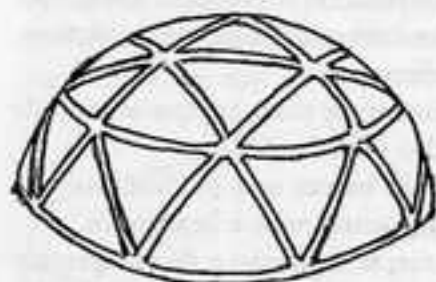
A figura mostra um tensegrity executado a partir de um prisma.

A figura mostra outro tipo, executado pela colocação de barras rígidas reversas nas faces de um octaedro virtual, com a conseqüente ligação de suas pontas com cabos. Outras formas de tensegrity podem ser criadas a partir de outros poliedros, seguindo determinadas regras de formação.

Associação contínua

O único exemplo de interesse prático da associação contínua cabo x pilar ocorre nas coberturas de lonas, em que a lona é considerada uma associação contínua de cabos.

Observações gerais

a) Essa associação apresenta grande riqueza formal, podendo ser utilizada para estruturas de cobertura e de piso;
b) Gera estruturas que apresentam leveza tanto física como visual;
c) Os materiais que podem ser utilizados são o aço, o concreto e a madeira. Destaca-se entre eles o aço, pela sensação de leveza que o material transmite.

Associação arco x arco

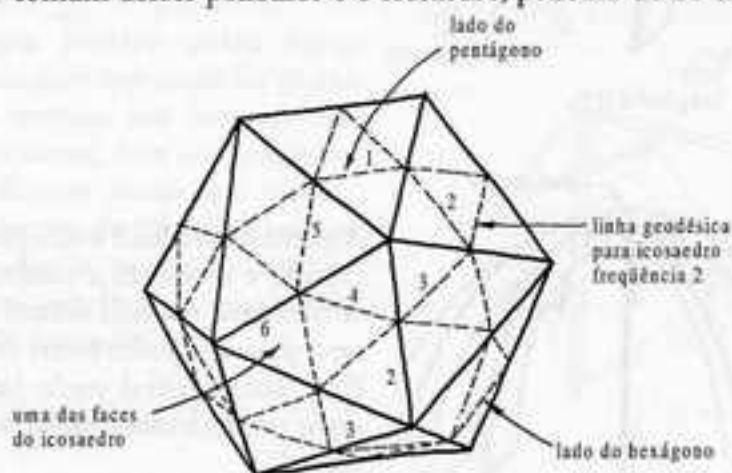
a. Associação discreta

Os arcos podem ser associados paralelamente, ortogonalmente, radialmente ou segundo geodésicas.

A associação ortogonal apresenta maior interesse prático quando se torna contínua, criando uma casca de dupla curvatura, que será discutida mais adiante.

A associação radial é usada para criar cúpulas e apresenta a característica de necessitar um anel central em seu topo para acomodar todos os arcos. Esse anel central pode também servir como elemento de iluminação zenital.

A associação geodésica parte da disposição dos arcos segundo curvas geodésicas. Denomina-se curva geodésica a curva de menor comprimento sobre uma esfera.

Assim, os arcos segundo as geodésicas encontram-se dispostos no menor caminho das forças e, portanto, menos solicitados do que em outra posição qualquer, resultando em estruturas muito leves.

Na prática, a associação geodésica não é formada por arcos verdadeiros, mas por segmentos de barras. Teoricamente, os arcos só ocorrem quando as barras forem excessivamente numerosas, tendendo ao infinito.

Para a formação das geodésicas, parte-se de poliedros que podem ser inscritos ou circunscritos em uma esfera.

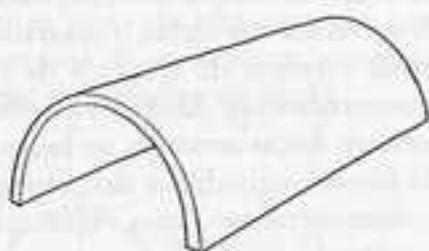
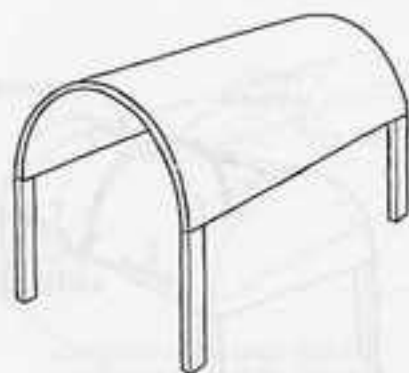
O mais comum desses poliédros é o icosaedro, poliedro de 20 faces.

Dividindo as faces do icosaedro, que formam triângulos eqüiláteros, em outros triângulos e projetando os vértices obtidos sobre uma esfera que circunscreva o icosaedro, são obtidos sólidos com maior numero de vértices, tornado-os cada vez mais próximos da esfera.

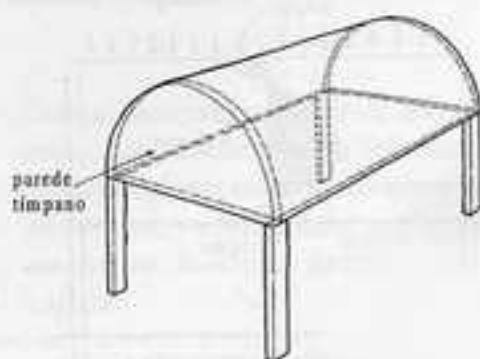
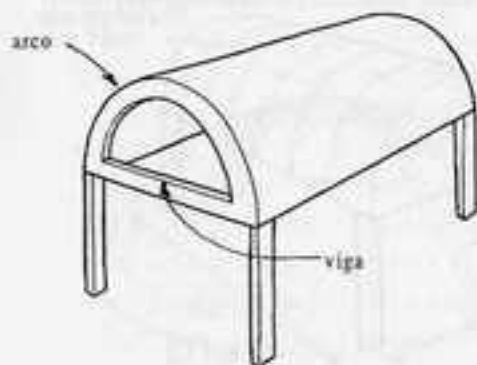
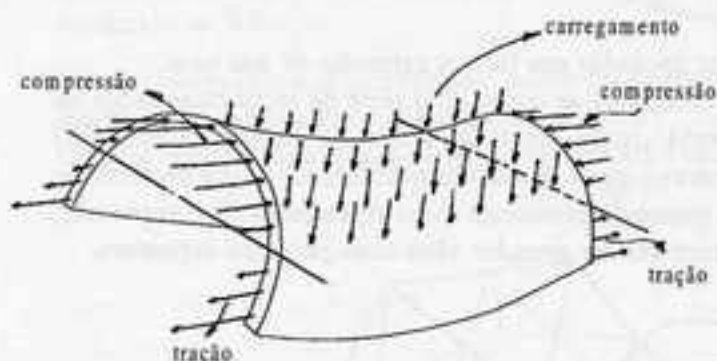
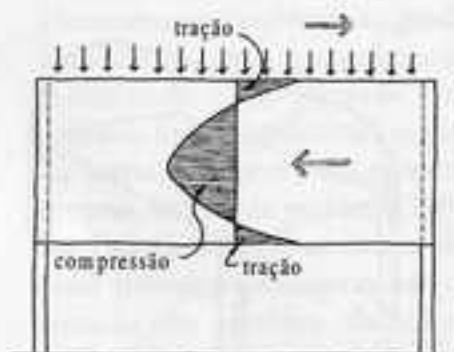
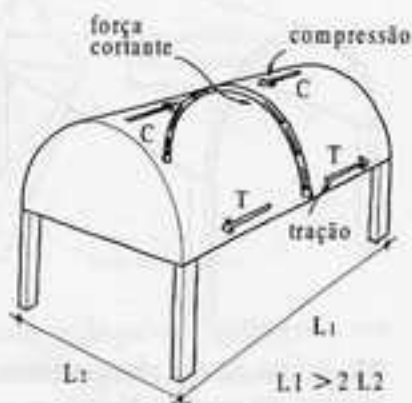
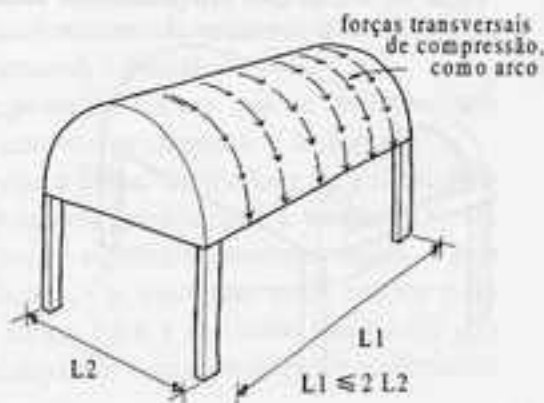
Denomina-se freqüência da geodésica o número de vezes em que se procede à divisão das faces triangulares do icosaedro inicial.

A estrutura assim formada é composta de barras que se desenvolvem segundo linhas geodésicas, organizadas em pentágonos e hexágonos.

As barras dessa estrutura estão sujeitas a forças de tração e de compressão simples. O grande problema das estruturas geodésicas é a forma de vedá-las. Em virtude da sua leveza são muito sujeitas a movimentações, o que pode provocar problemas nas vedações. Os materiais mais usados para vedação são madeira, alumínio e lonas. Para a execução das barras das geodésicas podem ser usados materiais como o aço, a madeira e o alumínio.

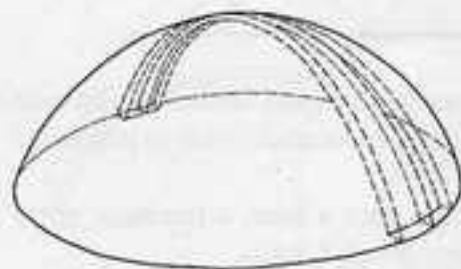
Associação contínua

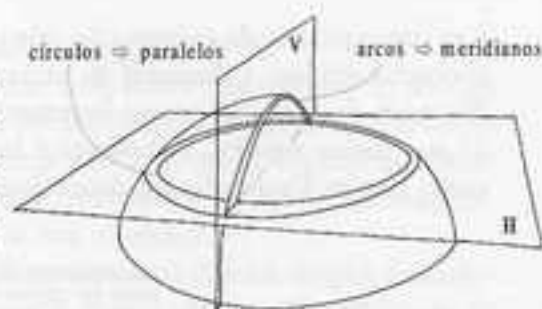
A primeira associação contínua arco x arco que se analisará será a paralela, obtida pela colocação lado a lado de arcos infinitamente próximos, o que resultará em uma lâmina denominada abóbada.

As abóbadas podem ser apoiadas em toda a extensão de sua base. Neste caso, a abóboda comporta-se como uma série de arcos biapoiados ou biengastados. A forma desse tipo de abóbada segue as mesmas recomendações feitas para os arcos. A mais importante é a de dar preferência à forma catenária, para que se desenvolvam somente esforços de compressão, o que permite à estrutura vencer grandes vãos com pequena espessura.

As abóbadas podem também ser apoiadas em apenas quatro pontos.

Neste caso, o seu comportamento torna-se bem mais complexo. Para serem estáveis, é necessário que os seus extremos sejam enrijecidos por paredes, vigas ou arcos; esse enrijecimento recebe o nome de tímpano.

As abóbadas podem ser classificadas em longas e curtas.
As longas são as que têm comprimento bem maior que o dobro do seu raio de curvatura e as curtas, o contrário. As abóbadas desenvolvem, de maneira geral, esforços de tração e de compressão, tanto longitudinal como transversalmente. Além desses esforços, para que o equilíbrio se complete, ocorrem forças cortantes ao longo de sua espessura.
As forças longitudinais são preponderantes nas abóbodas longas, fazendo-as comportar-se como vigas: quando biapoiadas, ocorrem forças de compressão nas fibras superiores e de tração nas inferiores.

Nas abóbadas curtas, a distribuição das forças de tração e de compressão longitudinais sofre grande alteração, ocorrendo tração nas fibras superiores e inferiores e compressão nas intermediárias.
Nas abóbadas curtas, ao contrário das longas, as forças transversais, comportando-se como arcos, são muito significativas.

forças longitudinais de compressão e tração

Em conseqüência da compressão que ocorre nas suas fatias transversais, as abóbadas tendem a diminuir de tamanho.
No meio do vão, isto ocorre livremente; já junto aos tímpanos, por causa da sua maior rigidez, a abóbada é impedida de se deformar, ocorrendo então flexões longitudinais, denominadas perturbações de borda.

comportamento como placa engastada, nos dois apoios

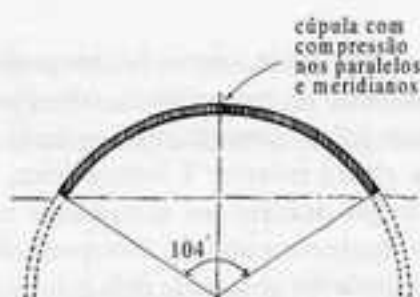
Essas flexões exigem um aumento de espessura da abóbada na região. A perturbação de borda é amortecida rapidamente, não atingindo grande parte da abóbada. Entretanto, nas abóbadas curtas, a sua influência é significativa, fazendo com que a abóbada apresente comportamento muito próximo ao de uma placa, com predominância de flexão.

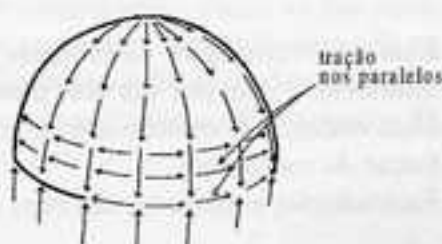
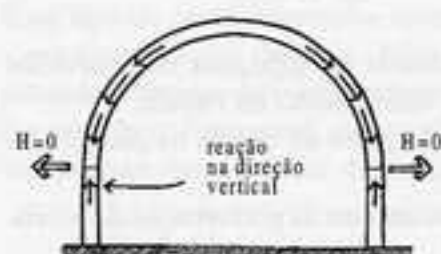
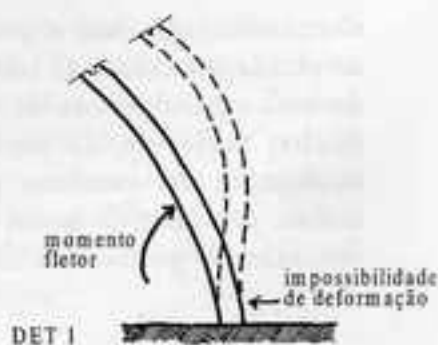
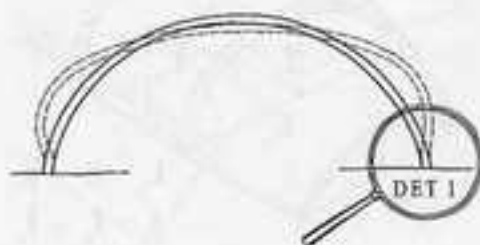
Em virtude do comportamento não muito adequado das abóbadas curtas, o seu uso não é indicado para cobrir espaços quadrados.

Outra associação contínua arco x arco pode ser obtida pela colocação radial de arcos infinitamente próximos, resultando em uma estrutura laminar denominada cúpula.

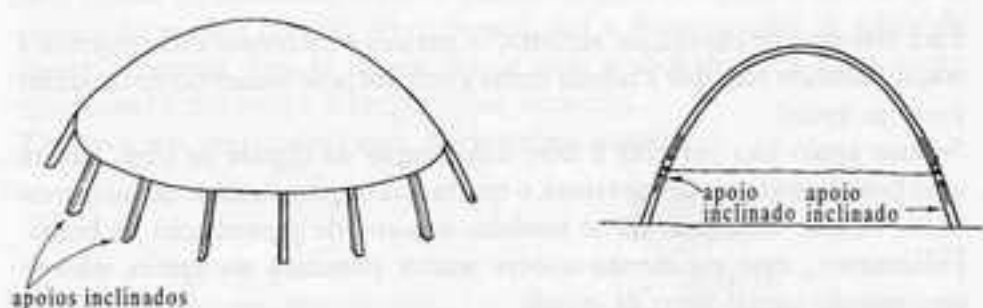
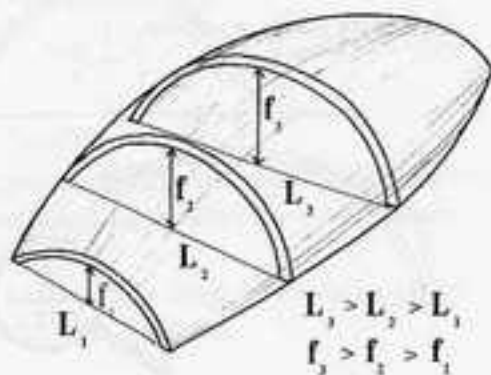
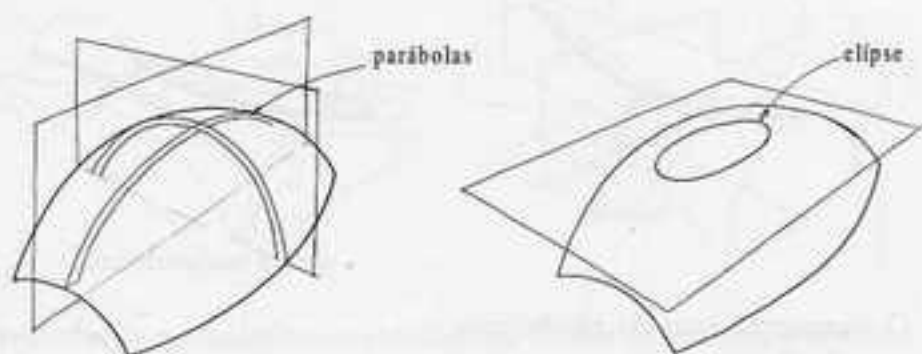
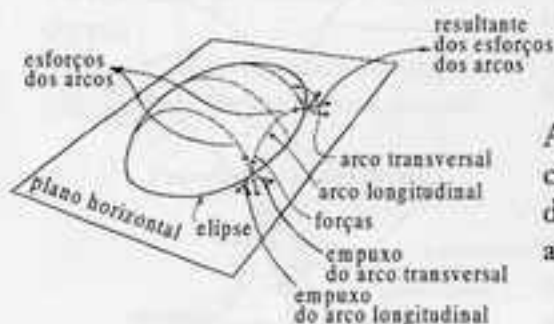
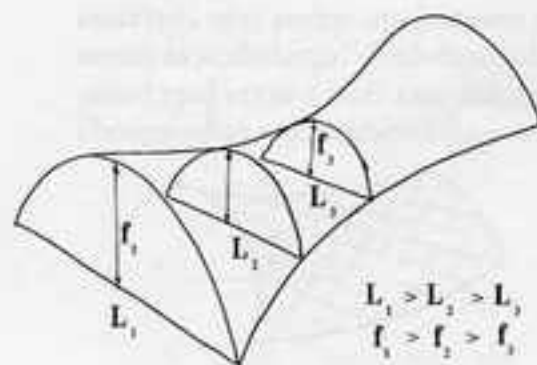
A cúpula, se secionada por planos verticais, apresenta meridianos que têm a mesma forma do arco que lhe deu origem. Se secionada por planos horizontais, apresenta círculos denominados paralelos.

Os paralelos comportam-se como anéis de travamento dos arcos dos meridianos.
Ao contrário dos arcos discretos que, para um determinado carregamento, apresentam apenas uma única possibilidade de forma que resulte tão somente em compressão - o chamado arco funicular, as abóbadas apresentam comportamento funicular, para qualquer tipo de carregamento, excetuando-se cargas pontuais. Isso se deve ao fato de os paralelos não permitirem livre deformação dos arcos meridianos.
Com isso, para qualquer carregamento, exceto cargas concentradas, os arcos meridianos trabalharão sempre com forças de compressão simples, permitindo vencer grandes vãos, com cúpulas de pequenas espessuras.
A possibilidade de flambagem das paredes da cúpula, devido à sua esbeltez, é geralmente muito pequena graças à sua dupla curvatura.
Se a cúpula for secionada por dois planos verticais ortogonais, tem-se duas curvas de mesma direção de curvatura, daí a denominação de casca de dupla curvatura. Isso já não acontece com a abóbada, em que a seção transversal é um arco e a longitudinal, uma reta.
Esta, por sua vez, é uma casca de curvatura simples.

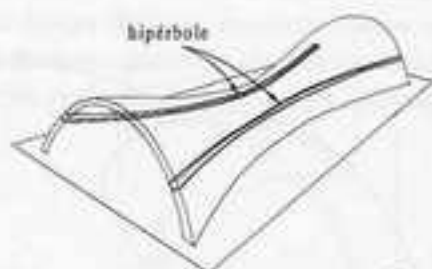
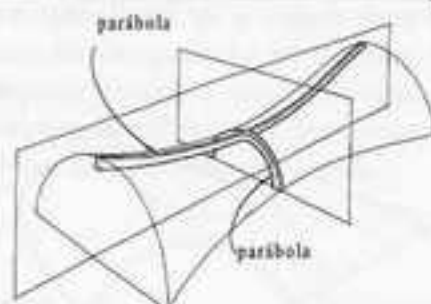
Ao ser carregada por uma carga uniforme, como seu peso próprio, a cúpula deforma-se.

posição do círculo antes do carregamento
porção que diminui de tamanho ⇒ compressão
porção que aumenta de tamanho ⇒ tração
52 52

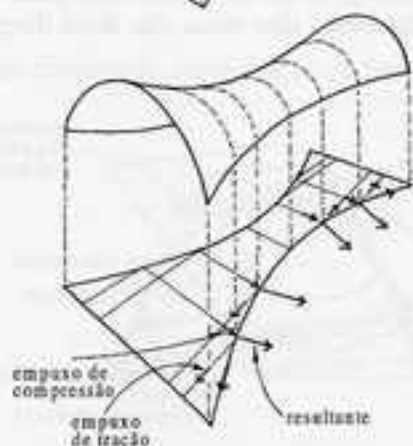
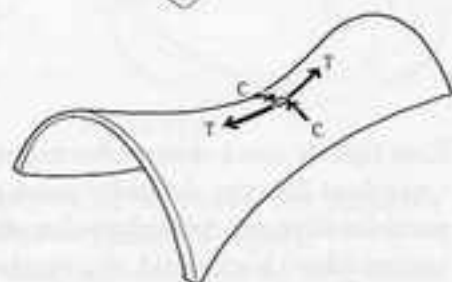
Observe-se que os paralelos da parte superior da cúpula tendem a diminuir de tamanho e os da parte inferior a aumentar, mostrando estar os primeiros a compressão e os segundos a tração.
Considerando um ângulo medido do topo para a base, a transição entre compressão e tração, nos paralelos, ocorre com 52 graus.

Conclui-se daí que para uma cúpula estar totalmente comprimida, tanto na direção dos meridianos como na dos paralelos, ela deverá ter uma abertura angular de 104 graus.

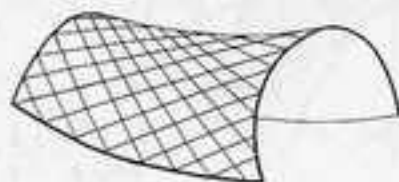
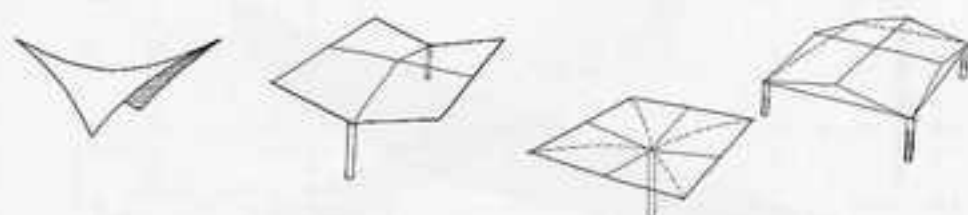
As condições de contorno das cúpulas, ou seja, como se apoiam em suas bordas, são de fundamental importância para o seu comportamento. Suponha-se uma cúpula semi-esférica.
Se os apoios forem verticais, ou seja, na direção das forças internas dos meridianos, o equilíbrio se fará sem maiores problemas.

Para esse tipo de cúpula, no entanto, os paralelos inferiores estão sujeitos a tração, fazendo com que a cúpula tenha a tendência de aumentar de tamanho junto ao apoio.
Se esse apoio não permitir a livre deformação da cúpula na base, haverá uma brusca mudança de curvatura, o que indica o aparecimento de momento fletor. A esse fenômeno dá-se também o nome de perturbação de borda.
Felizmente, esse momento ocorre muito próximo ao apoio, não se propagando para o resto da cúpula.
A resistência da cúpula a esse esforço de borda se faz aumentando a sua espessura junto ao apoio.

Além do próprio comportamento estático da cúpula, outros fatores podem provocar perturbação de borda, como aumento de temperatura, cujo efeito pode ser três vezes superior ao provocado pelo carregamento vertical.
Por outro lado, se a cúpula tiver uma altura inferior à hemisférica, as perturbações poderão ser maiores. As forças devidas aos meridianos não serão verticais, o que determinará o aparecimento de componentes horizontais nos apoios. Essa componente pode ser absorvida pela colocação de um anel na borda da cúpula.

Esse anel restringirá ainda mais a tendência de dilatação dos paralelos inferiores, o que, por sua vez, provocará maior flexão na cúpula.
Uma maneira de evitar o anel é colocar os apoios da cúpula na direção das forças do meridiano.
Essa solução, entretanto, não evita o aparecimento da perturbação de borda.

Outra associação arco x arco pode ser obtida pela colocação lado a lado de arcos parabólicos de vãos e flechas variáveis, de modo que aumentem do extremo para o centro. A superfície assim obtida denomina-se parabolóide elíptico.

A denominação parabolóide vem do fato de que cortes transversais e longitudinais feitos nessa superfície por planos verticais resultam em parábolas; cortes feitos com planos horizontais resultam em elipse.

Esse tipo de casca desenvolve esforços de compressão - como os dos arcos - nas duas direções definidas pelos planos verticais, e de tração, segundo os paralelos elípticos definidos pelos planos horizontais. Se os bordos estiverem em um plano horizontal, eles receberão concomitantemente os esforços de compressão dos arcos das duas direções.

A resultante desses esforços tem como funicular aproximada a forma da elipse, o que é favorável para o arco elíptico que resulta na borda.

Outra associação, semelhante à anterior, é feita com arcos parabólicos, cujos vãos e flechas diminuem da extremidade para o centro, resultando na superfície mostrada na figura ao lado, denominada parabolóide hiperbólico.

A denominação parabolóide hiperbólico vem do fato de que cortes feitos com planos verticais ortogonais resultam em parábolas e cortes feitos com planos horizontais resultam em hipérboles.

O comportamento do parabóloide hiperbólico resume-se no comportamento de "arcos" a compressão, em uma direção, e de "cabos" a tração, na direção transversal à primeira.

Os empuxos dos "arcos" e dos "cabos" são transmitidos às bordas da superfície como forças de tração e de compressão, em duas direções ortogonais.

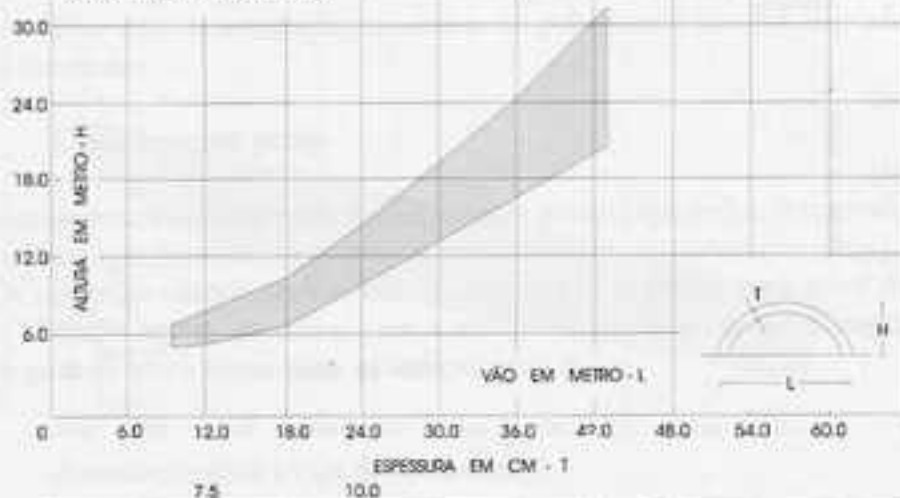
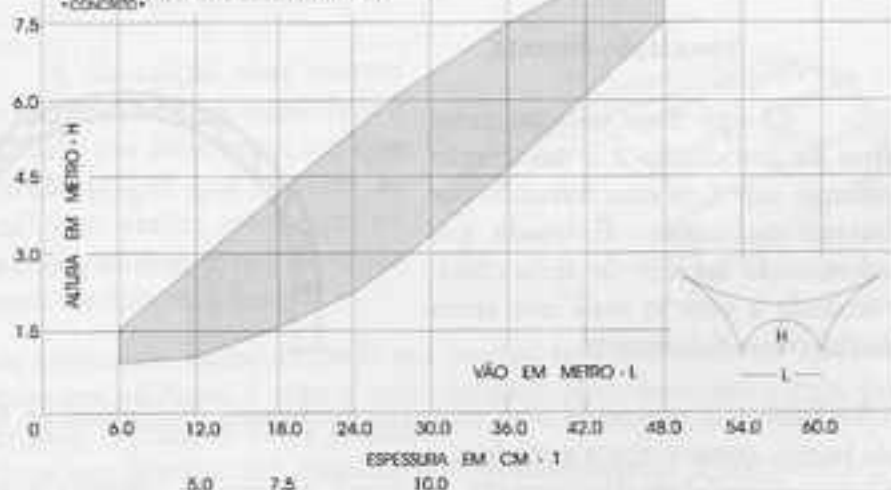
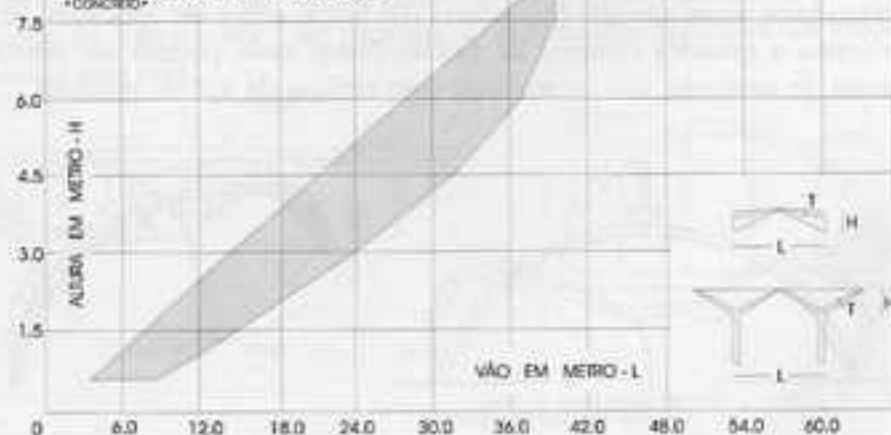
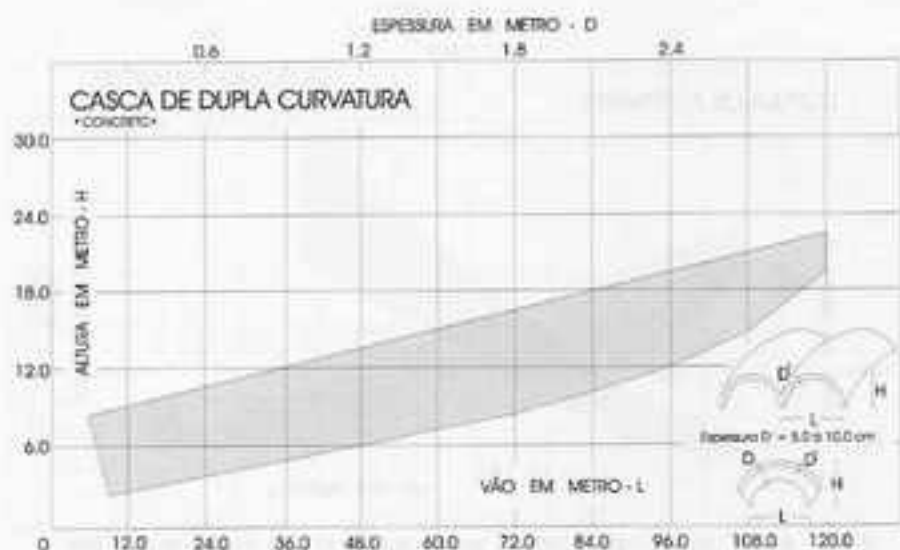
Se as bordas externas dessa superfície estiverem contidas em um plano horizontal, resultarão em arco hiperbólico cuja forma é aproximadamente a funicular das resultantes dos empuxos das forças de compressão e de tração que atuam sobre ele.

Notar que, no caso da cúpula e do parabolóide elíptico, as curvas originadas dos cortes devidos aos planos verticais resultam em curvas com curvatura na mesma direção, para baixo; no caso do parabolóide hiperbólico, as curvas apresentam curvaturas opostas, uma dirigida para cima e outra para baixo. As superfícies do primeiro tipo são denominadas sinclásticas e as do segundo tipo anticlásticas.

As superfícies anticlásticas, em razão das curvaturas opostas, são mais resistentes e tendem a ser mais esbeltas.

Outra característica interessante das superfícies anticlásticas é que elas podem ser obtidas de elementos retos, o que facilita a sua execução. Interseções feitas no parabolóide hiperbólico, assim como associações de partes desse parabolóide resultam nas mais diversas e elegantes superfícies.

Considerações gerais

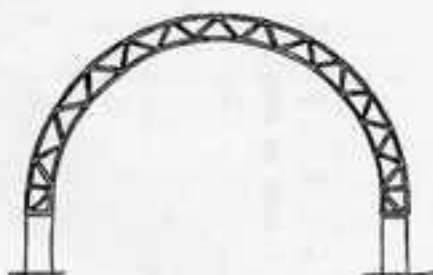
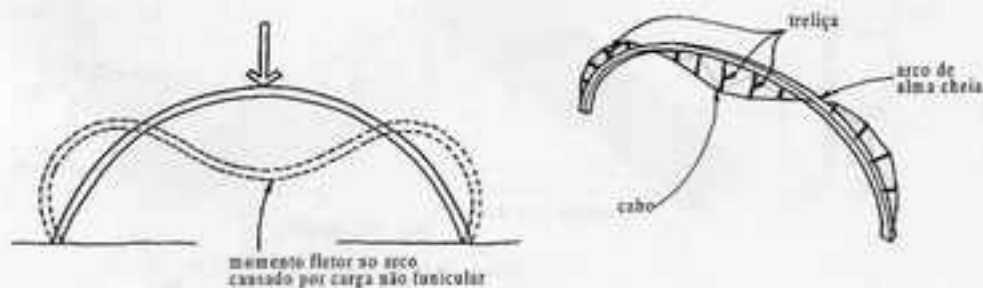
a) As abóbadas curtas devem ser evitadas, em virtude do seu comportamento não muito adequado;
b) Esse tipo de associação, pela predominância de curvas, é indicado para coberturas;
c) As associações contínuas apresentam grande gama de possibilidades formais, sendo aplicadas em situações em que a forma é o requisito mais importante;
d) Os materiais usados nesse tipo de associação podem ser o aço, o concreto e a madeira. O concreto é o mais freqüente, por ser facilmente moldável às curvas;
e) Materiais de alvenaria, como tijolo e pedra, podem ser usados nas formas em que predomina a compressão.

Pré-dimensionamento

ESPESSURA EM CM - T
6.25
7.5
10.0
ABÓBADAS MÚLTIPLAS
- CONCRETO
7.5
6.0
4.5
3.0
1.5
ALTURA EM METRO - D
VÃO EM METRO - L
T
D
L
0
6.0
12.0
18.0
24.0
30.0
36.0
48.0
54.0
60.0
ESPESSURA EM CM - T
20.0
30.0
40.0
ABÓBADA DE ALVENARIA
15.0
12.0
9.0
6.0
3.0
ALTURA EM METRO - H
VÃO EM METRO - L
T
H
L
0
3.0
6.0
9.0
12.0
15.0
18.0
24.0
27.0
30.0
ESPESSURA EM CM - T
5.0
7.5
10.0
12.5
CÚPULA •CONCRETO•
15.0
12.0
9.0
6.0
3.0
ALTURA EM METRO - H
VÃO EM METRO - L
T
H
L
0
9.0
18.0
27.0
36.0
45.0
54.0
63.0
72.0
81.0
90.0

ESPESSURA EM CM - T
* 60.0
CÚPULA DE ALVENARIA
30.0
24.0
18.0
12.0
6.0
ALTURA EM METRO - H
T
H
L
VÃO EM METRO - L
0
6.0
12.0
18.0
24.0
30.0
36.0
42.0
48.0
54.0
60.0
ESPESSURA EM CM - T
7.5
10.0
PARABOLOIDE HIPERBÓLICO
• CONCRETO •
7.5
6.0
4.5
3.0
1.5
ALTURA EM METRO - H
H
L
VÃO EM METRO - L
0
6.0
12.0
18.0
24.0
30.0
36.0
42.0
48.0
54.0
60.0
ESPESSURA EM CM - T
5.0
7.5
10.0
PARABOLOIDE HIPERBÓLICO
• CONCRETO •
7.5
6.0
4.5
3.0
1.5
ALTURA EM METRO - H
T
H
L
T
H
L
VÃO EM METRO - L
0
6.0
12.0
18.0
24.0
30.0
36.0
42.0
48.0
54.0
60.0

Associação arco x treliça

Associação discreta

O tipo mais comum desse tipo de associação é a associação interna, isto é, o arco formado por barras treliçadas. É usada em substituição ao arco de alma cheia, tornando a solução mais leve tanto visual como fisicamente.

Obviamente, é executada com materiais facilmente disponíveis na forma de barras, como o aço e a madeira.
Outra possibilidade de associação, mais rara, consiste no emprego da treliça como elemento colaborador do arco de alma cheia. Usa-se essa associação quando os arcos não são funiculares das forças sobre ele aplicadas, ficando sujeitos a grandes esforços de flexão. Neste caso, podem ser associados arcos de concreto, aço ou madeira com treliças de aço ou madeira.

Associação contínua

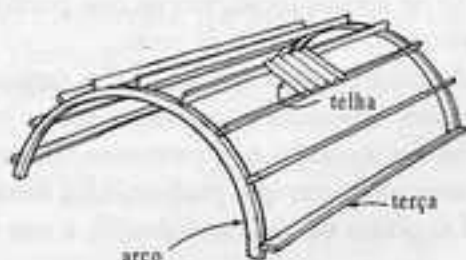
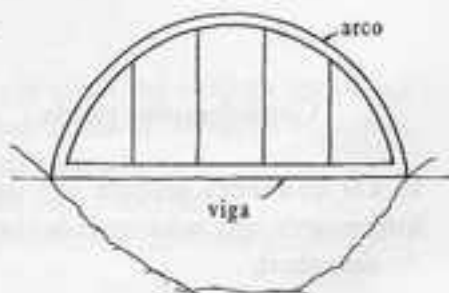
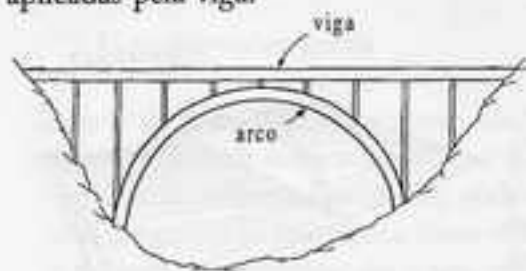
Este tipo de associação não existe ou pelo menos não foi cogitado até o momento.

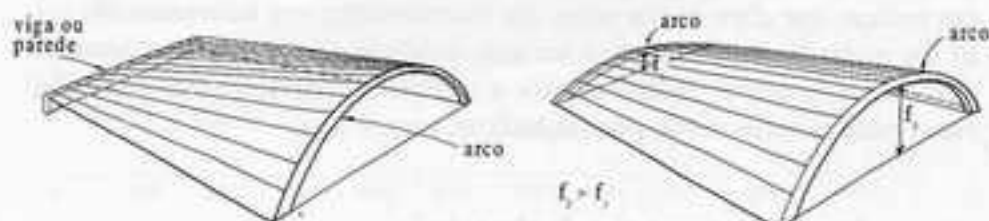
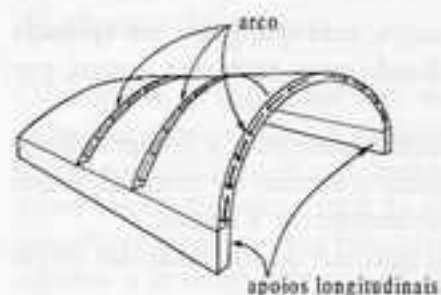
Considerações gerais

a) Essa associação permite resultados formais pouco explorados, resultando em treliças que abraçam os arcos ora externamente ora internamente;
b) Os materiais usados podem ser aço, concreto e madeira, para arcos de alma cheia, e aço e madeira, para a treliça. O material mais utilizado, tanto para os arcos como para as treliças, seria o aço.

Associação arco x viga de alma cheia

Associação discreta

A associação mais comum entre o arco e a viga de alma cheia é a utilizada nas coberturas, em que as terças (vigas que apoiam as telhas), executadas com vigas de alma cheia, apoiam-se nos arcos que formam a estrutura principal.

Outra associação muito utilizada em pontes, mas que pode ser aplicada também em edifícios, é com o arco utilizado para sustentar a viga, por intermédio de tirantes ou de pilares.
Como é um sistema que trabalha predominantemente a compressão, o arco pode vencer grandes vãos com pequeno consumo de material, o que não ocorreria com a viga, sujeita predominantemente a flexão.
A forma do arco deverá ser próxima ao máximo do funicular das forças aplicadas pela viga.

Associação contínua

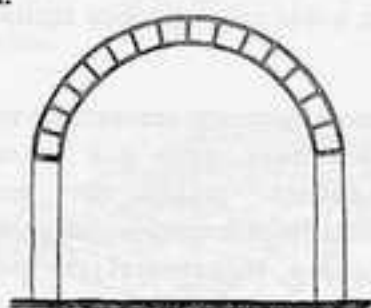
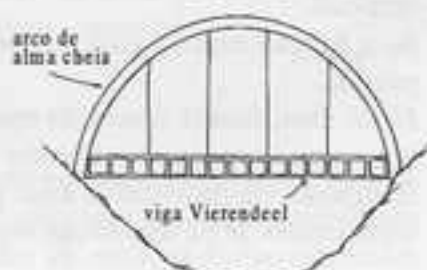
Um tipo de associação contínua entre viga e arco pode ocorrer pela colocação lado a lado de vigas infinitamente próximas (a laje) que se apoiam, em uma extremidade, em elemento reto ou curvo - uma viga, uma parede ou um arco - e, na outra extremidade, em um arco.
A superfície assim obtida recebe o nome de conóide.

O comportamento dos conóides depende da forma como são apoiados.
Se os apoios localizam-se nos bordos longitudinais, o conóide comporta-se como uma série de arcos.
A maioria não é funicular das cargas, devendo ocorrer flexão, o que exige maior espessura e, portanto, maior consumo de material.
Se for apoiado nos extremos transversais, o conóide comporta-se como uma placa em que predomina a flexão.
Do ponto de vista econômico, é um tipo de associação pouco interessante.

Considerações gerais

a) Os conóides podem ser uma interessante aplicação em coberturas do tipo shed;

b) Devido às curvaturas, essa associação não é aplicada a pisos;
c) Todos os materiais podem ser usados, exceto alvenarias, por predominar a flexão nesse tipo de associação.

Associação arco x viga Vierendeel.

Associação discreta

Uma primeira possibilidade de associação é a interna, em que o arco de alma cheia pode ser substituído por uma arco Vierendeel.

Outras formas de associação são semelhantes às vistas para o arco e a viga de alma cheia, ou seja, a viga Vierendeel é suportada, mediante tirantes ou pilares, por um arco de alma cheia ou Vierendeel.
Valem as mesmas considerações feitas para aquele tipo de associação.

Associação contínua

Não existe ou ainda não foi cogitado este tipo de associação.

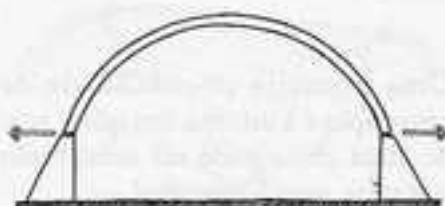
Considerações gerais

a) Trata-se de uma associação pouco usada, já que a sua análoga em treliça apresenta resultados mais econômicos. Entretanto, em ocasiões especiais, por motivos formais ou funcionais, pode ser aplicada;
b) Pode ser utilizada tanto para pisos como para cobertura;
c) Os materiais a empregar são o aço, o concreto e a madeira, sendo o aço o mais indicado.

Associação arco x pilar

Associação discreta

Este tipo de associação não apresenta soluções especiais. Deve ser lembrado que o empuxo horizontal do arco provoca momento fletor no pilar, o que exige que este tenha maiores dimensões.

Como o momento aumenta do topo para a base, para que as suas dimensões sejam as mais econômicas, é necessário que a altura da seção transversal do pilar aumente do topo para a base.

Como já foi comentado no caso da associação cabo x arco, a utilização de um cabo na base do arco elimina a transmissão do empuxo para o pilar. Lembrar também que, quando dois arcos iguais apoiam-se sobre o mesmo pilar, os empuxos horizontais são anulados, resultando somente em cargas verticais.

Se a ligação entre o arco e o pilar for rígida, tem-se como resultado um pórtico.

Neste caso, haverá interação entre os esforços no arco e no pilar, de forma que surgirão momentos fletores até em arcos funiculares.

A ligação rígida entre o arco e o pilar resulta em algumas vantagens, semelhantes às da associação viga x pilar, que será analisada mais adiante.

Associação contínua

A associação contínua arco x pilar resulta numa abóbada apoiada continuamente sobre uma parede.

O seu comportamento pode ser considerado idêntico ao das abóbadas com apoio contínuo, já analisado.

Considerações gerais

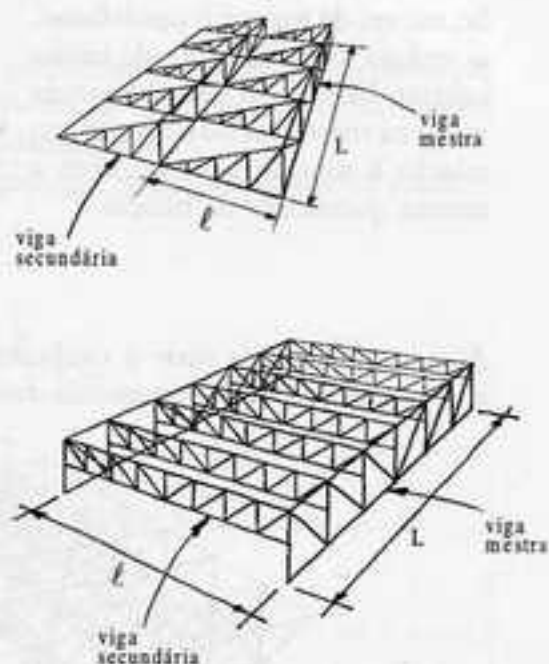
a)Essa associação é muito comum em coberturas industriais e em ginásios esportivos;

a)Em princípio, não apresenta grandes variações formais;

c)Todos os materiais podem ser usados.

Associação treliça x treliça

Associação discreta

Um primeiro tipo de associação treliça x treliça é obtido quando uma série de treliças colocadas em sentido longitudinal apoiam-se em outras dispostas transversalmente. Essa solução apresenta aplicação prática interessante nas coberturas em shed. Algumas soluções de estrutura para piso também a utilizam, principalmente quando as treliças transversais, denominadas mestras, encontram-se muito espaçadas.

É usada quando o vão entre apoios, em uma direção, é significativamente maior do que na outra. Na prática, quando $L > 2\ell$, em que L é o vão maior e ℓ o menor, o uso dessa associação apresenta interesse.

Associação contínua

Considerem-se duas treliças apoiadas nos seus extremos e cruzando-se no centro, como mostra a figura "a". Qualquer carga que solicite o conjunto será suportada pelas duas. Se o número de treliças for aumentado, certamente a eficiência do conjunto aumentará (figura "b").

figura "a"

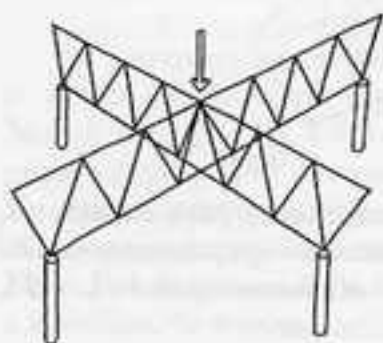
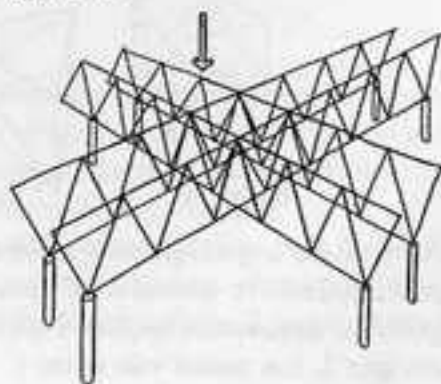
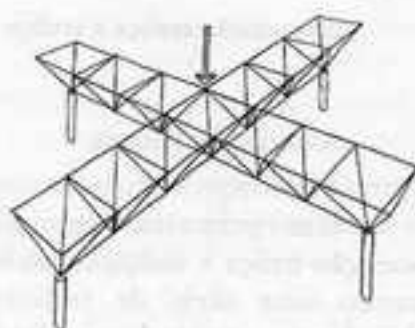
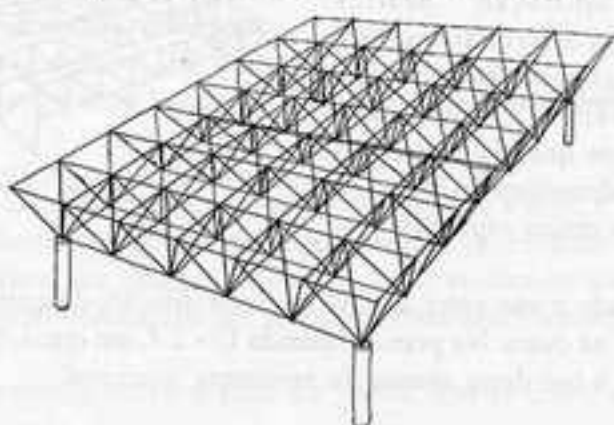



figura "b"

Se, em vez de manter o paralelismo, as treliças forem unidas pelo banzo inferior, haverá um aumento ainda maior na resistência do conjunto em relação à solução anterior, com a mesma quantidade de treliças.

Aumentando ainda mais o conjunto de treliças, obtém-se um sistema constituído de treliças ortogonais denominado treliça espacial.

Muitas podem ser as formas de compor treliças espaciais.
A composição é feita com módulos prismáticos padronizados, de diferentes geometrias. Pode-se construir treliças espaciais a partir de prismas retangulares com faces trianguladas, como mostra a figura "a".
Pode-se também usar como módulo o prisma triangular com faces em treliças, como na figura "b". Cabe, ainda, utilizar pirâmides de base quadrada, que são os módulos mais comuns na prática (figura "c").

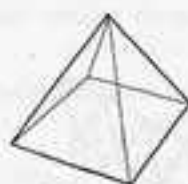
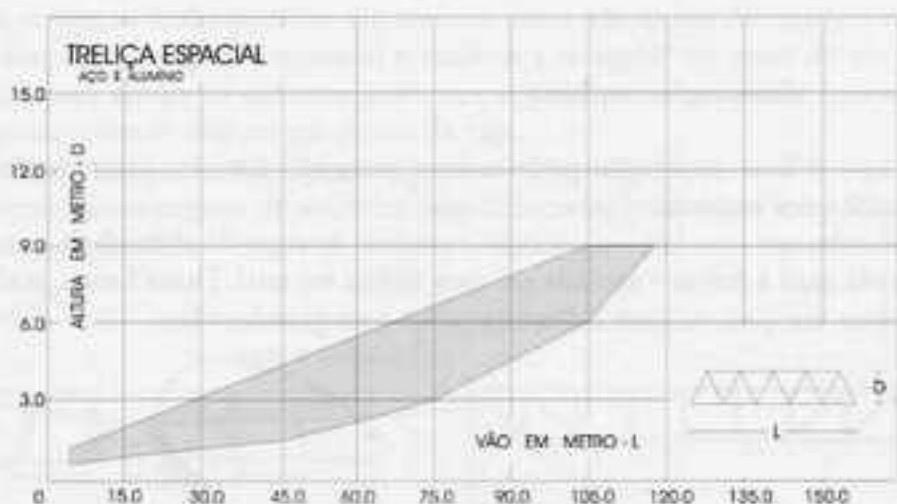



figura "a" figura "b" figura "c"

As treliças espaciais são utilizadas normalmente para coberturas, principalmente quando os apoios apresentam espaçamentos muito grandes, nas duas direções. Na prática, são eficientes quando $L > 2\,l$, em que L é o maior vão entre pilares e l, o menor.

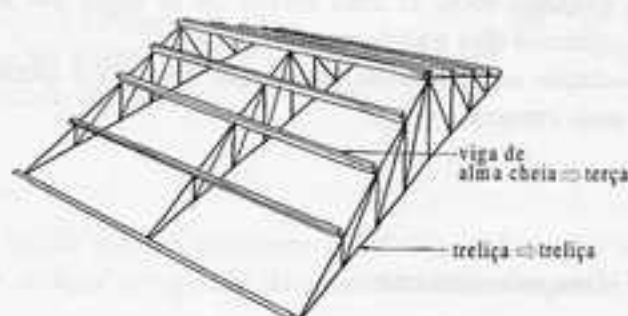
Considerações gerais

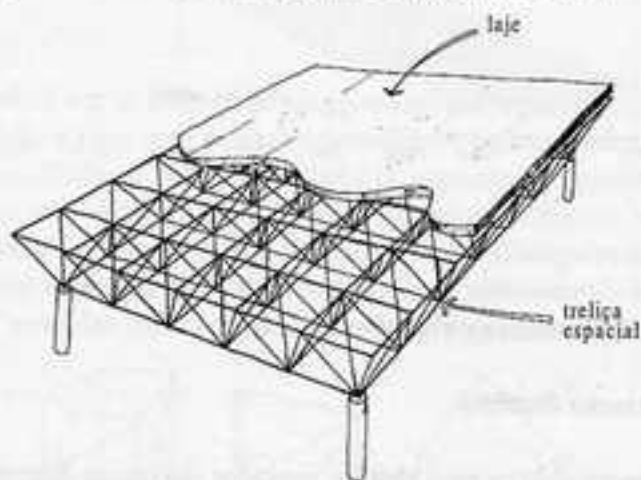
a) As treliças espaciais são usadas predominantemente para coberturas planas com grandes vãos. É uma forma de se fugir das formas curvas abobadadas, quando elas não forem desejadas.
b) Essa associação usa materiais como aço, madeira e alumínio, sendo o primeiro o mais comum.

Pré-dimensionamento

Associação treliça x viga de alma cheia

Associação discreta

Ocorre quando os vãos a serem vencidos são muito diferentes, numa e noutra direção, como normalmente ocorre nas estruturas de telhado. Nestas, normalmente, a direção longitudinal permite vãos relativamente pequenos que podem ser vencidos por vigas de alma cheia.
Na direção transversal, o vão deve ser normalmente grande, para liberação de espaço, podendo, então, ser vencido economicamente com uma treliça. Nesse tipo de associação, as vigas de alma cheia recebem o nome de terça e as treliças, de tesoura.

Solução idêntica pode ser usada para pisos, substituindo a tesoura por uma viga em treliça de banzos paralelos.

Associação contínua

Essa associação pode ocorrer, mas não é muito interessante em aplicações práticas.
Resulta em uma laje - associação contínua de vigas de alma cheia que será vista mais à frente - apoiada em uma treliça espacial. Desta forma, pode-se obter um piso ou uma cobertura plana com grandes vãos.

Considerações gerais

a) Essa associação pode ser utilizada tanto para pisos como para coberturas;
b) Não apresenta grande variedade formal;
c) Os materiais que podem ser utilizados são o aço e a madeira.

Associação treliça x viga Vierendeel

Associação discreta

Uma primeira associação entre treliça e viga Vierendeel pode ocorrer internamente, por uma mescla entre elas. Sabe-se que a viga Vierendeel exige, para o seu adequado comportamento, que as barras dos montantes liguem-se rigidamente às barras das membruras superior e inferior.
Com isso, todas as barras ficam submetidas a momentos fletores.
A intensidade desses esforços decorre da tendência de deslocamento relativo entre as membruras e os montantes, provocado pelo esforço cortante horizontal (figura "a").
Note-se que os deslocamentos são maiores junto aos apoios da viga (onde os esforços cortantes são maiores) e tendem a se anular no meio do vão. Assim, para aliviar os esforços junto aos apoios, pode-se colocar barras diagonais, criando treliças em partes da viga.
Esse duplo comportamento permite uma solução mais econômica da viga, mantendo as vantagens de abertura proporcionadas pela viga Vierendeel, como na figura "b".

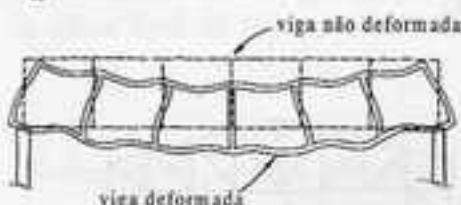
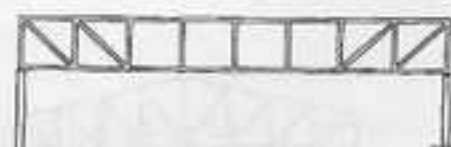
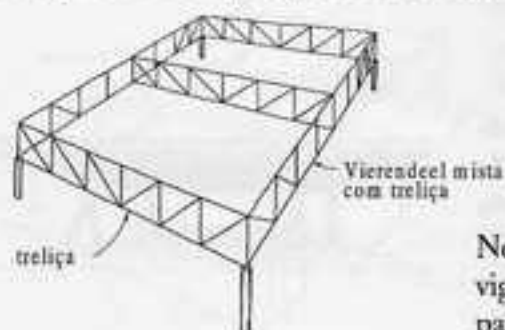



figura "a" figura "b"

Outro tipo de associação pode ocorrer pelo apoio de treliças em vigas Vierendeel ou vice-versa. Em princípio, o uso apenas de treliças é mais econômico, já que não desenvolvem esforços de flexão nas barras; por outro lado, as barras inclinadas podem ser um elemento de impedimento da passagem de tubulações pesadas ou mesmo de aberturas externas.

Neste caso, pode-se lançar mão de viga Vierendeel pura ou mista, com parte em treliça.

Associação contínua

Esse tipo de associação não existe ou ainda não foi cogitado.

Considerações gerais

a) Essa associação permite soluções que conciliam a vantagem das treliças - mais leves – com a das vigas Vierendeel - maior abertura;
b) Pode apresentar interessantes resultados formais;
c) O material mais indicado é o aço.

Associação treliça x pilar

Associação discreta

Se o pilar é de alma cheia, a associação normalmente resulta na treliça simplesmente apoiada sobre os pilares, ocorrendo uma ligação não rígida entre ambos (figura "a"). Se o pilar for em treliça, a ligação pode ser rígida, constituindo-se num pórtico (figura "b").
O pórtico será discutido mais adiante, quando for apresentada a associação rígida entre vigas de alma cheia e pilares.

figura "a"

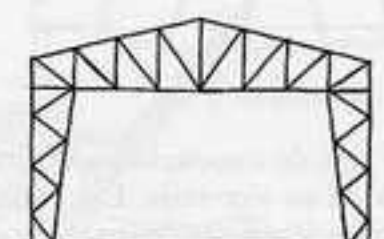



figura "b"

Associação contínua

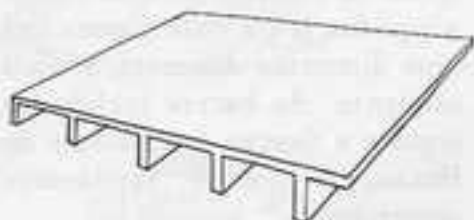
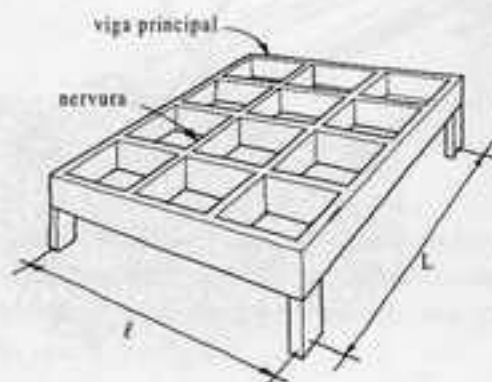
Normalmente, esse tipo de associação ocorre com o uso de treliça espacial apoiada sobre pilares isolados. O uso de treliças espaciais sobre paredes contínuas não apresenta interesse prático.

Considerações gerais

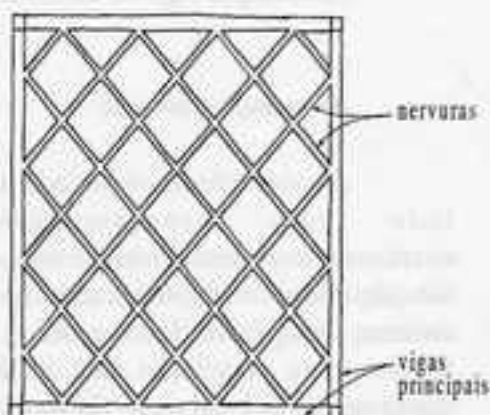
a) Essa associação pode ser usada para pisos e coberturas;
b) Permite o uso de grandes vãos;
c) Pode resultar em muitas possibilidades formais;
d) Os materiais mais usados são aço e madeira - para as treliças – e aço, madeira e concreto - para os pilares.

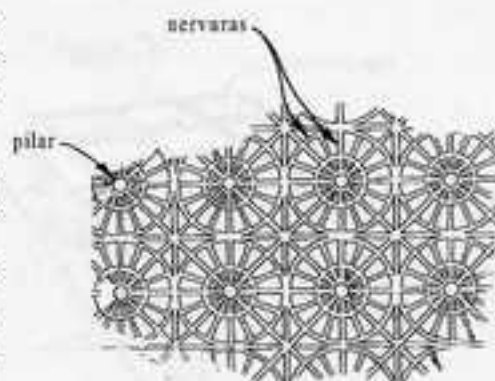
Associação viga de alma cheia x viga de alma cheia

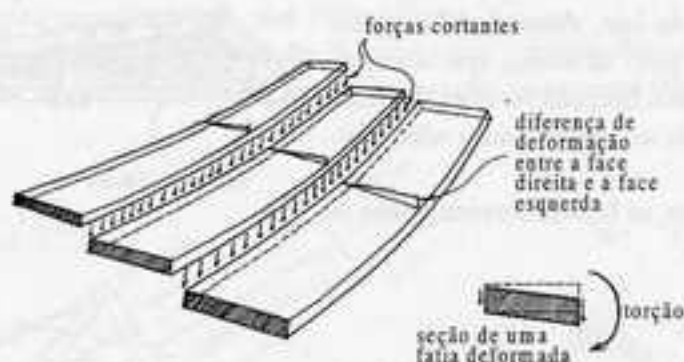
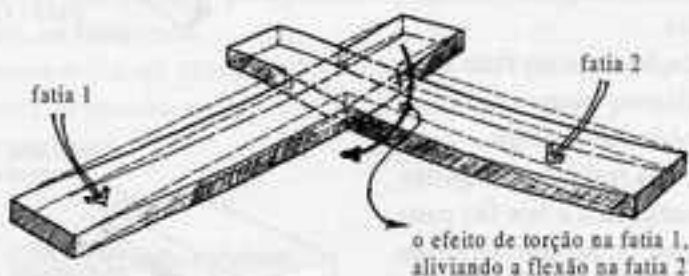
Associação discreta

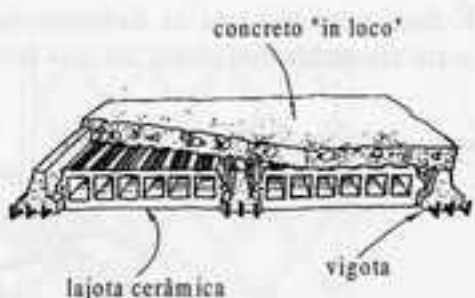
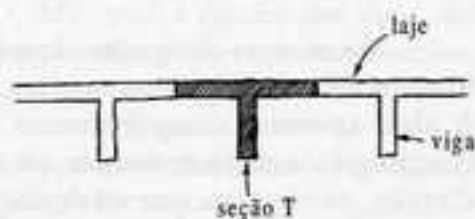
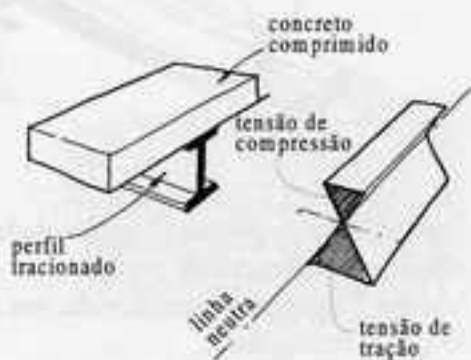
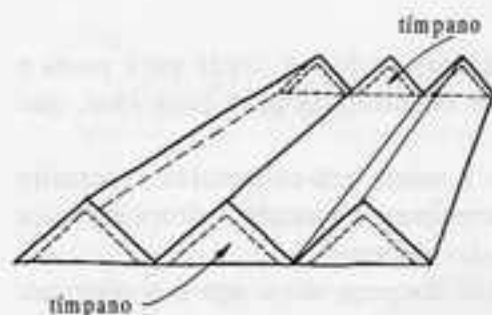
A colocação de vigas lado a lado com espaçamentos extremamente reduzidos é uma solução muito usada, resultando no sistema denominado nervurado.
O uso dessa associação visa, pela maior quantidade de vigas, diminuir a altura final do sistema estrutural.

Normalmente, a placa que constitui o piso e se apoia sobre o nervurado é a este incorporada, de maneira que as vigas passam a ter a seção T, o que faz com que as suas dimensões possam ser ainda menores.
Outro tipo de associação viga de alma cheia x viga de alma cheia é feita com vigas que se cruzam.

Nesta associação, denominada grelha, há a colaboração conjunta das vigas nas duas direções. Para que haja a efetiva colaboração das vigas nas duas direções e para que não ocorram apenas vigas apoiando-se sobre vigas, é necessário que as ligações nos cruzamentos sejam rígidas.

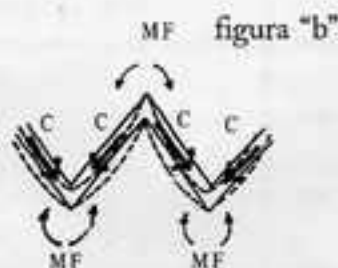
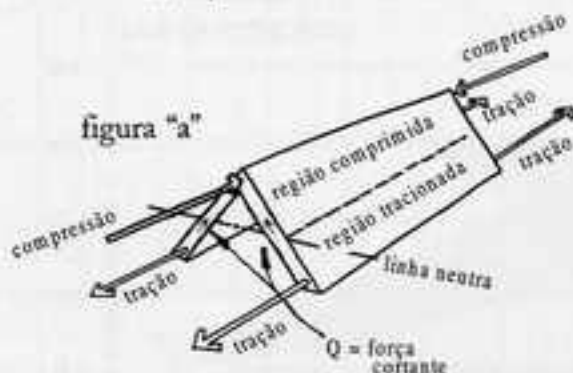
As grelhas são muito mais eficientes quando a relação entre o vão maior - L - e o vão menor - ℓ - for $L < 2\ell$, pois a rigidez das vigas são equivalentes e podem garantir a distribuição dos esforços nas duas direções. Lembrar que o conceito de rigidez envolve a relação entre a forma da seção e o comprimento da barra.
Uma barra com uma determinada seção pode ser considerada rígida se o seu comprimento for curto ou não rígida se for muito longo.
As grelhas são geralmente apoiadas no seu contorno por vigas que se apoiam em pilares.

As vigas das grelhas podem ser dispostas ortogonalmente às vigas periféricas ou inclinadas em relação a elas.
A solução com barras inclinadas, apesar de construtivamente menos adequadas, já que cada nervura terá uma dimensão diferente, é mais eficiente. As barras inclinadas seguem a direção dos esforços de flexão, o que é facilmente constatável.

Se os esforços de flexão se desenvolvem em direções ortogonais, chega-se à conclusão de que a resultante desses esforços é inclinada em relação às bordas. Desta forma, as barras inclinadas encontram-se na direção da resultante, absorvendo melhor os esforços.
As grelhas podem também apoiar-se diretamente nos pilares.
O comportamento deste sistema é diferente do de grelhas apoiadas em vigas. As nervuras podem ser distribuídas de muitas formas.

A figura mostra uma disposição particular de nervuras que é a mais adequada para a absorção dos esforços.
As nervuras encontram-se exatamente na direção dos esforços de flexão, absorvendo-os melhor.
A comprovação será apresentada quando se analisar a associação contínua entre viga de alma cheia e pilar.

Associação contínua

Se as vigas das grelhas forem dispostas infinitamente próximas, teremos como resultado uma placa.
A placa apresenta comportamento semelhante ao da grelha.
Imaginando a placa secionada em uma série de fatias, em uma única direção, verifica-se que qualquer carga aplicada a uma delas será transmitida por forças cortantes às imediatamente próximas. Estas, por sua vez, transmitem o esforço às demais pelo mesmo mecanismo.
É facil perceber que as deformações das fatias serão menores quanto mais afastadas estiverem da que tenha sido efetivamente carregada.

Tal diferença de deformação provoca torção na fatia.
É essa torção que diminui os esforços de flexão das fatias da outra direção, fazendo com que se aumente consideravelmente a capacidade da placa. É por isso que as placas apresentam possibilidade de vencer vãos relativamente grandes com espessuras reduzidas.

A associação de placas a vigas isoladas, já comentada anteriormente, pode permitir a utilização de vigas com seção T para absorver os esforços.
A seção T apresenta, sem dúvida, um comportamento muito mais favorável do que a retangular.

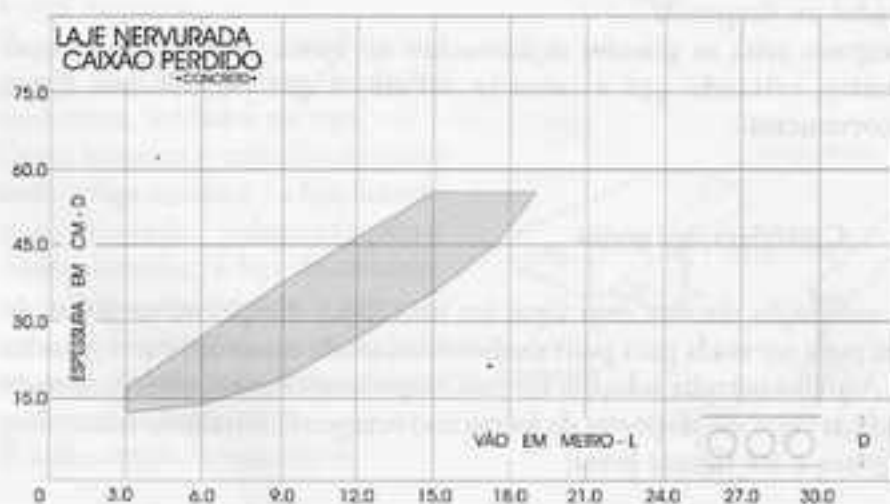
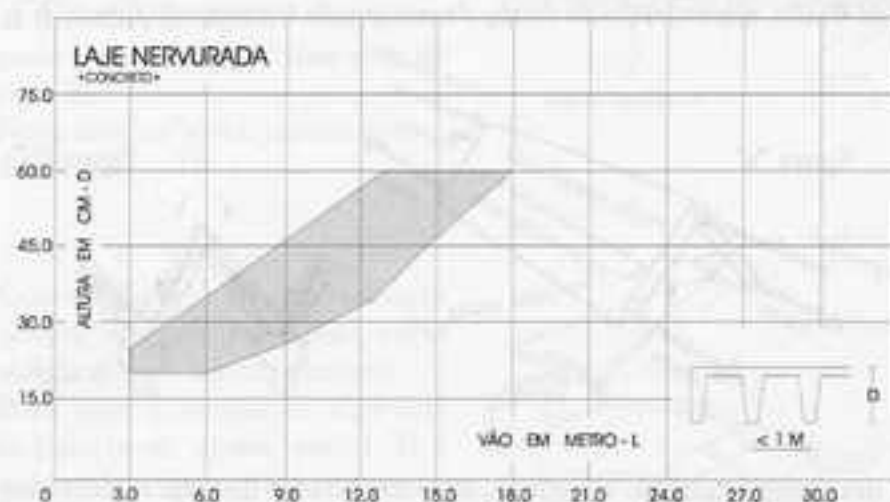
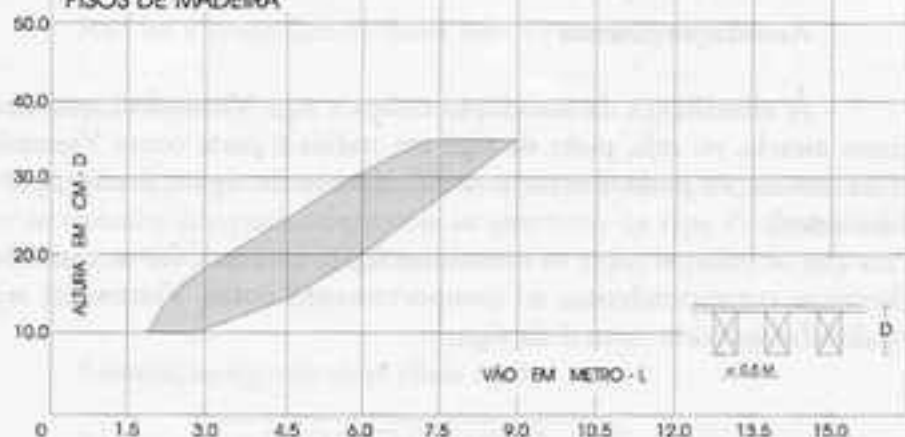
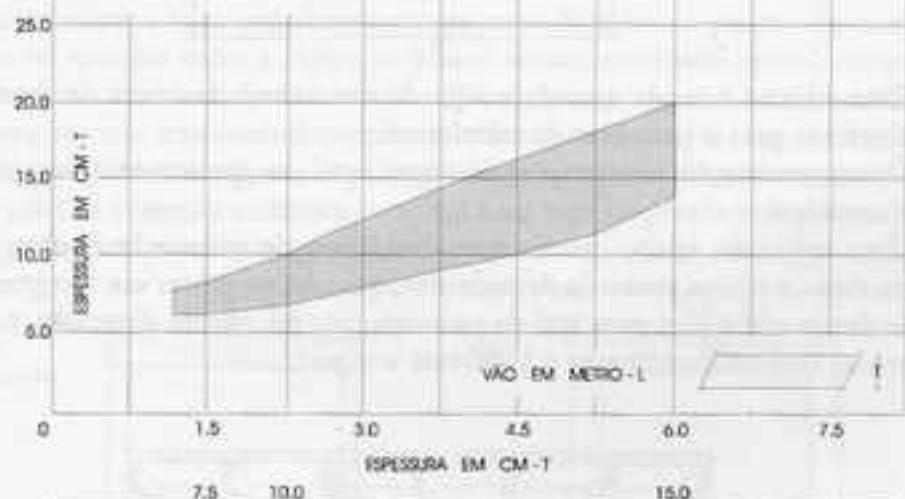
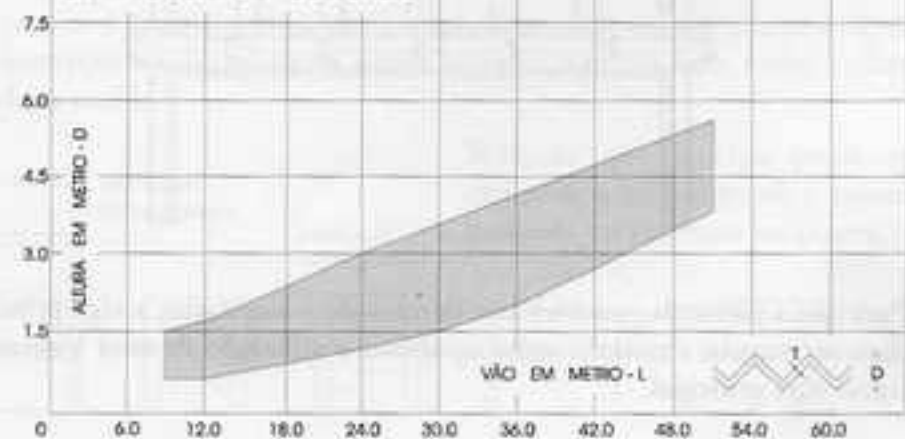
São inúmeras as aplicações desse tipo de associação.
Muito difundidas são as chamadas lajes pré-moldadas.
São compostas de: vigotas de concreto armado pré-fabricadas, que contêm a armação; lajotas de cerâmica ou de concreto, que servem como fôrma, e concreto moldado "in-loco", para completar a espessura necessária da laje.
O concreto fresco forma a placa superior da laje, denominada capa.
Note-se, pelo desenho, que a capa de concreto, lançada na obra, forma junto com as vigotas uma série de vigas T.
Neste caso, as lajotas servem apenas de fôrma.

Outra aplicação dessa associação ocorre quando juntamos vigas metálicas com laje de concreto.
Para que o conjunto viga-laje comporte-se como seção T é necessário que não ocorra o escorregamento da laje em relação à viga metálica.
Para isso, a ligação deve ser feita com pinos metálicos, denominados conectores, soldados na viga.
Dessa maneira, o trabalho conjunto entre a viga metálica e a laje faz com que, quando adequadamente dimensionados, a laje de concreto trabalhe a compressão e o perfil metálico a tração, ou seja, cada material trabalhando dentro de suas melhores características.
É a denominada viga mista.

A placa de concreto pode ter sua resistência aumentada por meio de dobraduras.

Essa solução, que resulta em uma casca, permite que as placas vençam vãos muito grandes com pequenas espessuras. As dobras comportam-se como vigas, absorvendo compressão na parte superior e tração na inferior.
Além disso, desenvolvem força cortante ao longo de sua espessura, com comportamento semelhante ao das vigas (figura "a").
Transversalmente, as placas dobradas desenvolvem esforços de compressão e/ou de flexão, dependendo da forma da sua secção transversal (figura "b").

Para um comportamento adequado, as extremidades das placas dobradas deverão ser enrijecidas por placas verticais semelhantes às usadas nas abóbadas, os tímpanos.
O tímpano evita as grandes deformações no apoio, causadas por forças cortantes, evitando que a casca se achate, o que prejudicaria o seu comportamento.

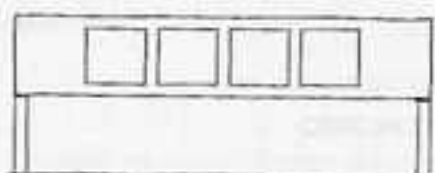
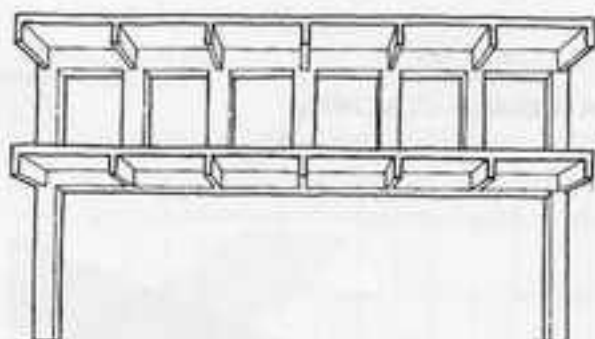
Considerações gerais

a) A associação discreta com vigas em uma única direção ou na forma de grelha pode ser usada para pisos e coberturas, sendo capaz de vencer grandes vãos. A grelha permite soluções formais muito interessantes, principalmente quando as vigas são dispostas de forma não ortogonal, formando triângulos, hexágonos e até figuras livres;

b) A associação contínua de lajes planas pode ser usada para pisos e coberturas, mas apresenta limitações econômicas para seus vãos, que geralmente não ultrapassam 10 m;
c) A associação de placas dobradas é usada em coberturas e permite resultados formais interessantes, principalmente quando a altura da casca é variável, acompanhando a variação dos esforços;
d) Os materiais usados nas associações discretas são o aço e o concreto. Nas associações contínuas prevalece o concreto, exceto nas vigas mistas.

Pré-dimensionamento

Associação viga de alma cheia x viga Vierendeel

Associação discreta

À semelhança da associação treliça x viga Vierendeel, que resulta numa mescla, ou seja, parte da viga em treliça e parte como Vierendeel, nesta associação pode ocorrer o mesmo: parte da viga é maciça, parte é Vierendeel.
Para que os esforços sobre os montantes sejam menores, faz-se com que as aberturas correspondentes ao comportamento como Vierendeel sejam localizadas na parte central da viga.

Essa solução é usada quando a viga de alma cheia necessita de grandes aberturas para a passagem de tubulações.
Outra associação ocorre quando vigas maciças apoiam-se sobre vigas Vierendeel.
Uma aplicação muito interessante desse tipo de associação ocorre, por exemplo, em uma passarela de pedestres, quando, ao vencer um vão grande, se deseja que a viga principal da passarela, por ter grande dimensão, possa apoiar concomitantemente a cobertura e o piso.

Para que a passarela possa ter boa iluminação e ventilação, a viga principal deve ser vazada, tornando assim oportuna a utilização de uma Vierendeel como viga principal.

Associação contínua

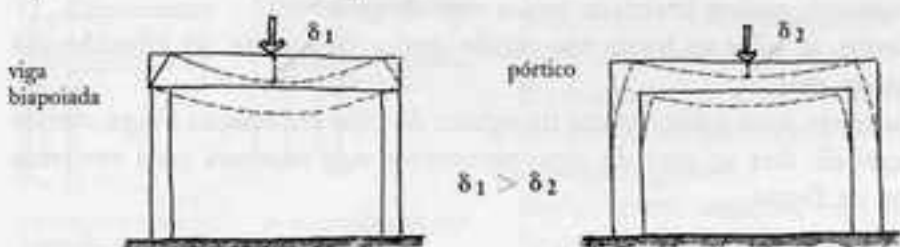
Não há a possibilidade desse tipo de associação.

Considerações gerais

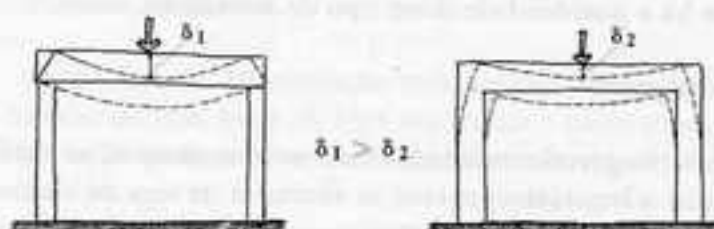
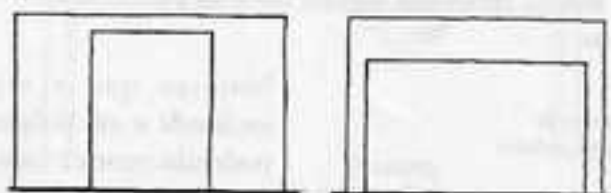
a) Essa associação permite resultados formais interessantes, na medida em que se trabalhe adequadamente com as aberturas na viga de alma cheia;
b) Permite o uso do aço e do concreto.

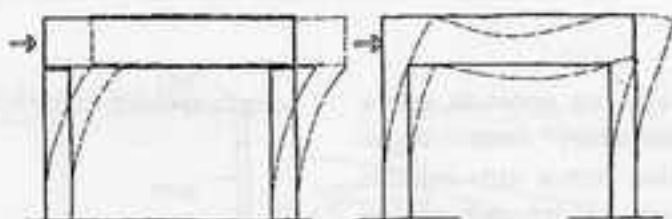
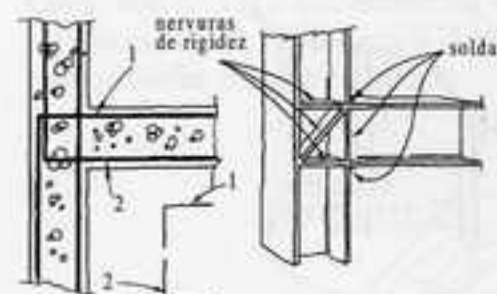
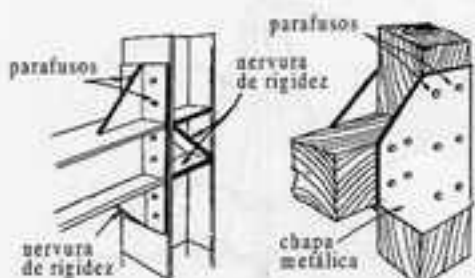
Associação viga de alma cheia x pilar

Associação discreta

A associação entre vigas e pilares pode ocorrer de duas formas. Na primeira, a viga está simplesmente apoiada sobre os pilares, de modo que os vínculos entre a viga e os pilares sejam: articulado móvel, em um dos apoios, e articulado fixo, no outro. Neste caso, a viga tem total liberdade para girar, não transmitindo ao pilar qualquer momento. Na segunda forma, a viga é rigidamente ligada ao pilar: qualquer giro que sofra será transmitido ao pilar. A primeira estrutura constitui uma viga biapoiada nos pilares; no segundo caso, tem-se um pórtico.

O pórtico é toda estrutura em que a ligação entre vigas e pilares é rígida. A ilustração abaixo apresenta alguns tipos de pórticos, com vários andares e várias pernas.

Note-se que a viga pode ser inclinada e até poligonal, o mesmo podendo ocorrer com os pilares.

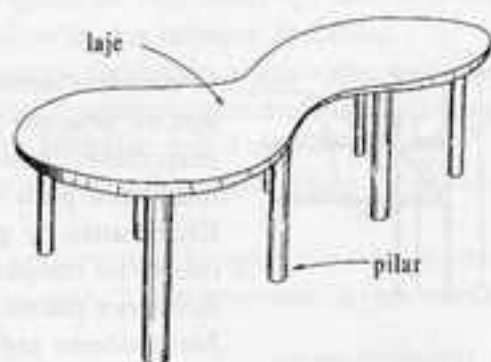
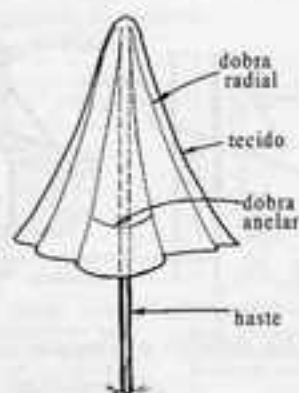
Suponha-se uma carga aplicada no centro da viga, nos dois sistemas apresentados na figura abaixo.

É fácil verificar que a viga biapoiada tende a sofrer uma deformação maior do que a viga do pórtico, pois pode girar livremente, o que não ocorre com o pórtico, no qual o giro da viga é impedido pelo pilar.
Portanto, as vigas dos pórticos têm menores dimensões, uma vez que são menos solicitadas do que as vigas simplesmente apoiadas.
Por outro lado, o pilar do pórtico passa a suportar, além da compressão simples, momento fletor, o que tende a aumentar as suas dimensões. Portanto, no pórtico as vigas tendem a ser menores e os pilares, maiores, se comparados com a situação de viga simplesmente apoiada (viga biapoiada).
À medida que a rigidez da viga muda em relação à dos pilares, ocorrem alterações na distribuição dos esforços de flexão.
Quando são muito mais rígidos do que as vigas, os pilares têm a tendência de absorver mais momento, aliviando a viga; conforme o pilar for aumentando, menor liberdade terá a viga de girar.
No limite, o pilar se torna tão rígido que a viga pode ser considerada engastada nele.
Ao contrário, com a diminuição da rigidez do pilar em relação à viga, menos oposição ele fará ao giro da viga, portanto a viga receberá cada vez mais esforço de flexão.

No limite, a oposição do pilar ao giro da viga pode ser tão pequena que a viga se comportará como biapoiada. Nos casos práticos, a rigidez do pilar e da viga têm normalmente a mesma ordem de grandeza.

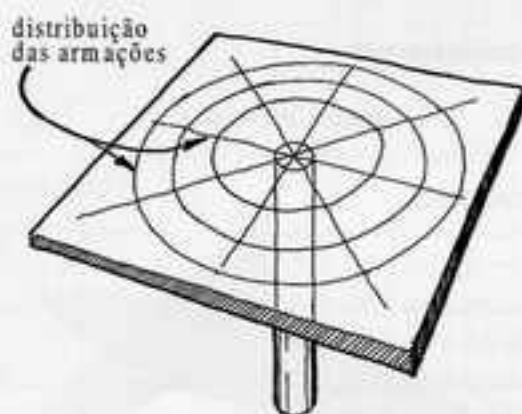
Os pórticos são mais interessantes para absorção de cargas horizontais do que as vigas biapoiadas.
No caso de vigas biapoiadas, a carga horizontal é absorvida apenas pelos pilares; no caso do pórtico, vigas e pilares colaboram.

A propriedade de absorver bem cargas horizontais faz com que o pórtico seja o elemento estrutural adotado para contraventamento de edifícios sensíveis às forças de vento, como os edifícios altos, ou em obras em que a aplicação de certos materiais, como o aço, resulte em estruturas esbeltas e pouco rígidas.
Os pórticos são estruturas que se adaptam adequadamente a materiais que absorvem bem momentos fletores.

O concreto armado, a madeira e o aço, ou seja, em princípio todos os materiais convencionais são indicados para uso em pórticos. Entretanto, o grande problema ocorre no enrijecimento da ligação de vigas e pilares.
No concreto armado, esse tipo de ligação é praticamente natural.
No aço, o uso de solda também simplifica bastante a execução de nós rígidos. Ligações com parafusos, apesar de possíveis, são mais complexas.
No caso da madeira, a execução de nós rígidos só é possível por meio de chapas metálicas ou de madeiras e parafusos, sendo pois mais trabalhosa do que com outros materiais.

Associação contínua

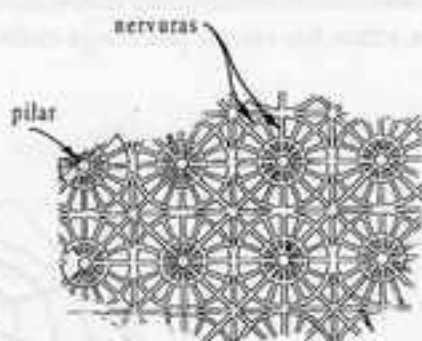
Viu-se que, se forem associadas lado a lado e infinitamente próximas, as vigas de alma cheia passam a comportar-se como uma placa, absorvendo esforços de flexão e cortantes.

Se essa placa for apoiada sobre pilares isolados, sem vigas intermediárias, temos uma solução muito interessante, denominada laje cogumelo.

A maior vantagem da laje cogumelo é não ter vigas como elemento constitutivo, o que facilita a sua execução e permite uma grande liberdade em suas formas e na disposição dos apoios.
Por outro lado, apresenta a desvantagem de exigir maior quantidade de material na placa e nos pilares.

Para entender o comportamento da laje cogumelo, imagine-se um modelo bem simples, por exemplo, um tecido apoiado por uma haste.
Vê-se que o tecido, além de dobrar radialmente em torno da haste, também dobra de forma anelar.
Isso mostra a tendência de desenvolver esforços de flexão radial e anelar.

Quando se trata da placa, que apresenta rigidez à absorção desses esforços, os momentos fletores radiais e anelares, também chamados de tangenciais, apresentam, no limite de ruptura, as trincas mostradas na figura ao lado. Essas trincas identificam a direção de tração, mostrando a disposição correta da armação, caso a placa seja construída com concreto armado.

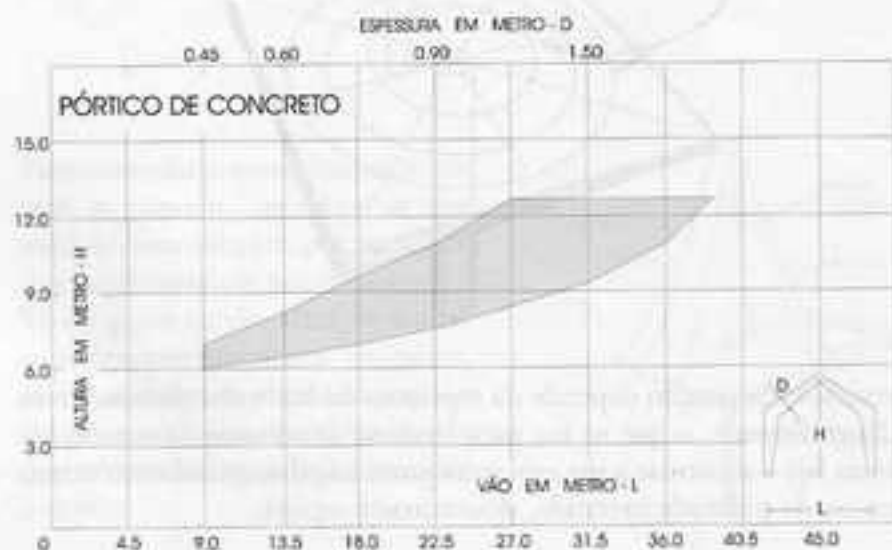
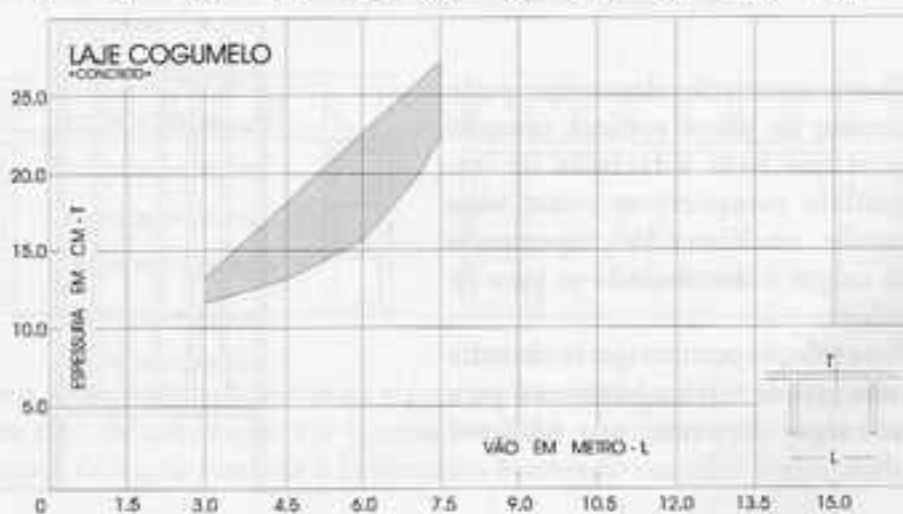
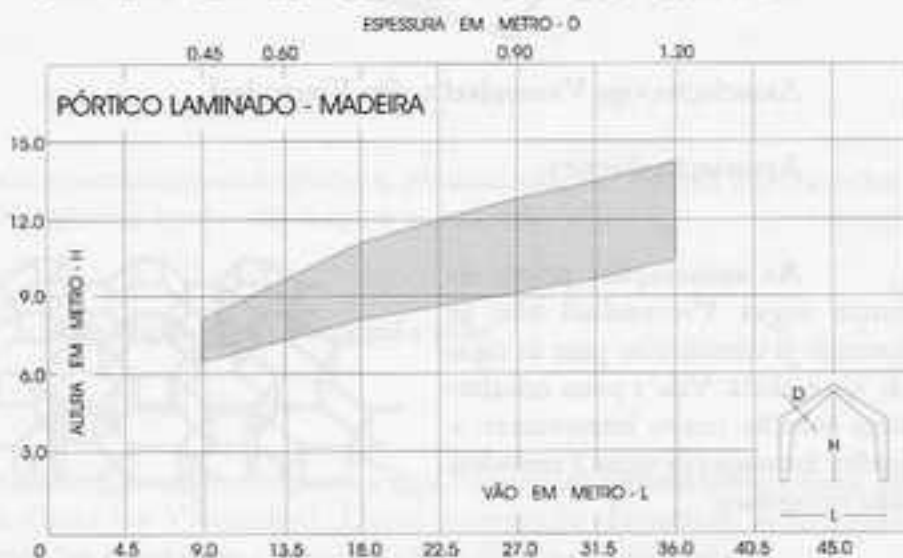
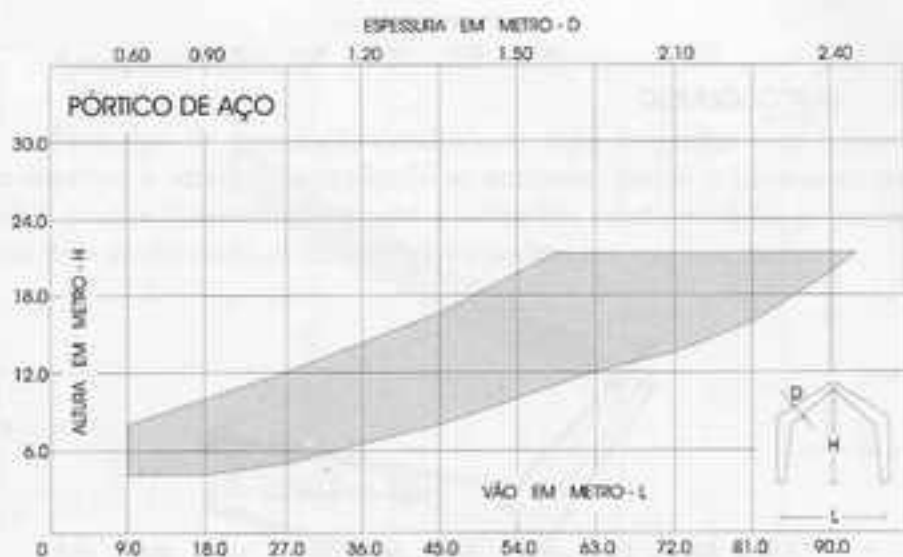
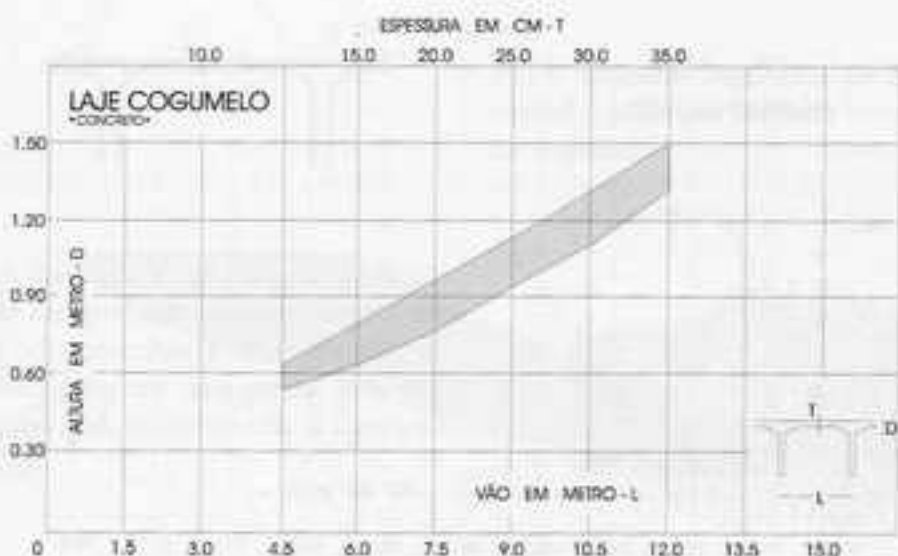
Outro esforço a que fica submetida a placa apoiada diretamente no pilar é o provocado pela possibilidade deste perfurá-la, como uma agulha. Esse esforço recebe o nome de punção.

A intensidade da punção depende da espessura da laje e das dimensões do pilar. Normalmente, o que se faz para reduzir ao mínimo as tensões de punção na laje é aumentar a sua espessura junto ao pilar, criando um tronco de cone ou de pirâmide invertido, denominado capitel.

Foi o desenho resultante de laje, capitel e pilar que inspirou o nome de cogumelo.

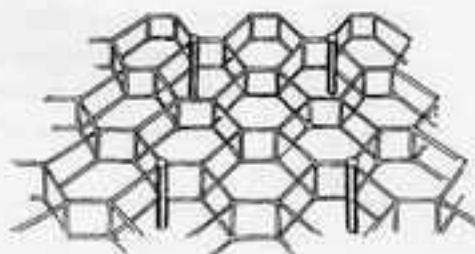
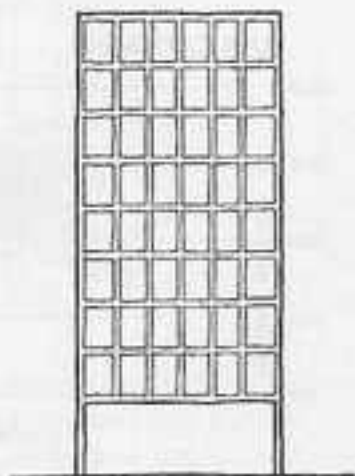
A forma como os esforços de flexão se desenvolvem, nas lajes cogumelo, pode orientar a distribuição de nervuras em uma grelha sem viga principal, como mostra a figura ao lado.

Considerações gerais

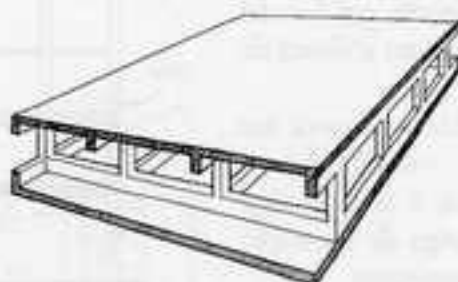
a) Essa é a associação mais utilizada;
b) As associações discretas apresentam poucas variações formais;
c) A laje cogumelo pode ser utilizada para pisos e coberturas.
Permite vãos relativamente grandes e uma riqueza formal muito grande.
A não existência de vigas facilita a organização mais livre das vedações.
É fácil de ser executada, mas consome muito material;
d) As associações discretas permitem utilizar aço, concreto e madeira.
A associação contínua permite apenas o uso do concreto.

Pré-dimensionamento

ESPESSURA EM METRO - D
0.60
0.90
1.20
1.50
2.10
2.40
PÓRTICO DE AÇO
30.0
24.0
18.0
12.0
6.0
ALTURA EM METRO - H
D
H
L
VÃO EM METRO - L
0
9.0
18.0
27.0
36.0
45.0
54.0
63.0
72.0
81.0
90.0
ESPESSURA EM METRO - D
0.45
0.60
0.90
1.20
PÓRTICO LAMINADO - MADEIRA
15.0
12.0
9.0
6.0
3.0
ALTURA EM METRO - H
VÃO EM METRO - L
0
4.5
9.0
13.5
18.0
22.5
27.0
31.5
36.0
40.5
45.0
LAJE COGUMELO
25.0
20.0
15.0
10.0
5.0
ESPESSURA EM CM - T
T
L
VÃO EM METRO - L
0
1.5
3.0
4.5
6.0
7.5
9.0
10.5
12.0
13.5
15.0

Associação viga Vierendeel x viga Vierendeel

Associação discreta

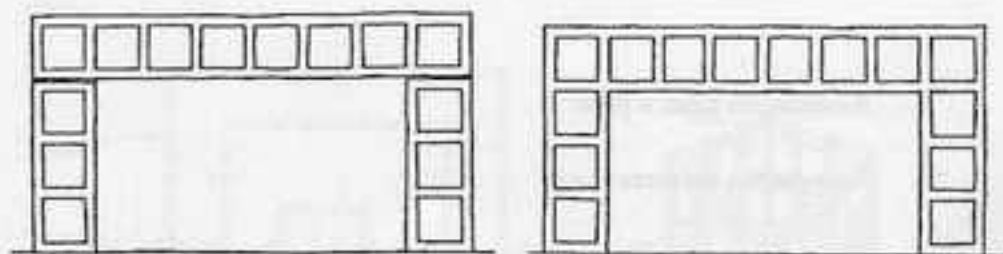
As associações possíveis entre vigas Vierendeel são as mesmas já comentadas para as vigas de alma cheia. Vale a pena ressaltar uma solução muito interessante: a grelha formada por vigas Vierendeel não ortogonais.

Outra associação desse tipo pode ocorrer no plano vertical, fazendo com que toda a fachada de um edifício comporte-se como uma parede em Vierendeel, suportando as cargas e distribuindo-as para os pilares.
Essa solução permite que se obtenha uma grande rigidez horizontal para as cargas de vento, nos edifícios altos.

Associação contínua

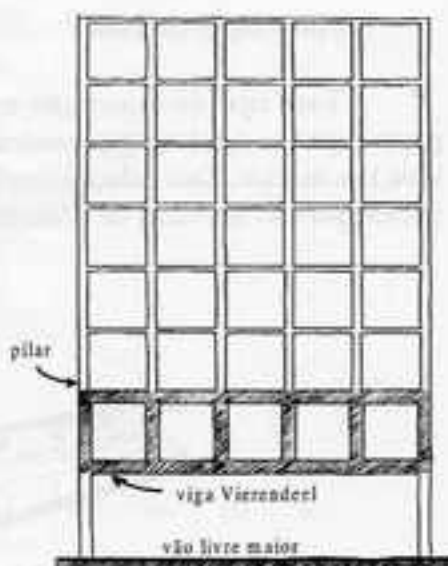
Esse tipo de associação resulta num tipo de grelha com laje na parte superior e inferior, escondendo as nervuras, dando a impressão de uma laje maciça. Essa solução recebe o nome laje caixão perdido, já que as fôrmas para as nervuras de concreto não podem ser reaproveitadas.

Considerações gerais

a) Essa associação, quando discreta, permite soluções formais bem variadas;
b) Os materiais usados são o aço e o concreto.

Associação viga Vierendeel x pilar

Associação discreta

Uma associação muito comum é a viga Vierendeel apoiada sobre pilares de alma cheia ou Vierendeel. Dessa associação decorrem as mesmas observações feitas para a associação viga de alma cheia e pilar.

Ou seja, dessa associação resultam vigas simplesmente apoiadas ou pórticos. Outro tipo de associação é a interna, na qual o próprio pilar pode ser composto de barras verticais e horizontais, formando um pilar Vierendeel.

Associação interessante ocorre quando pilares apoiam-se sobre a viga Vierendeel.
Pode ser usada quando temos que criar vigas de transição para uma seqüência de pilares próximos. Normalmente, as vigas de transição são bem altas, podendo, em função dos vãos e das cargas, ter a altura de um pé-direito.
Para que o pé-direito possa ser habitado, com ventilação e iluminação natural, o uso da viga Vierendeel como viga de transição é uma solução interessante.

Associação contínua

Não existe esse tipo de associação.

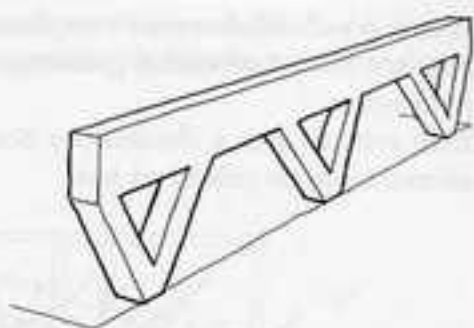
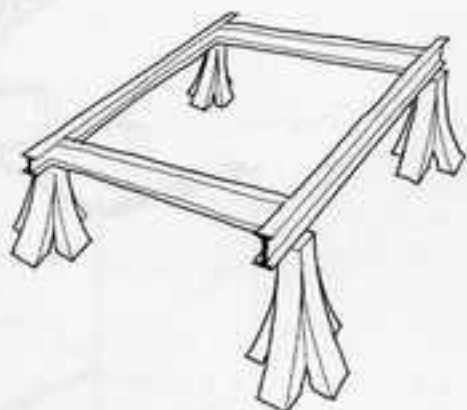
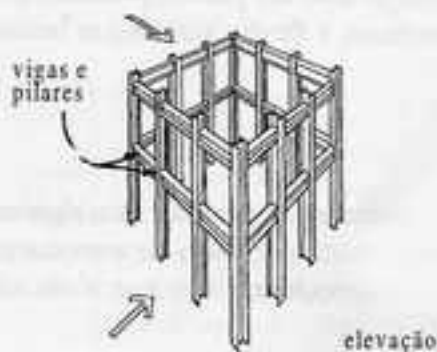
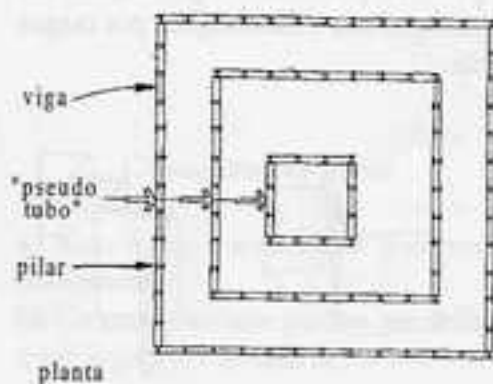
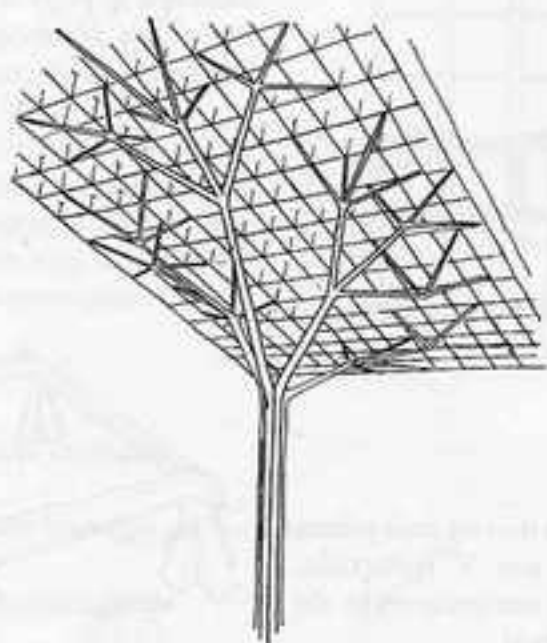
Considerações gerais

a) Essa associação pode apresentar alguns resultados formais interessantes, quando a viga e o pilar têm a forma Vierendeel.
É interessante lembrar que os vazios podem ter as mais variadas formas, como triângulo, hexágono, círculo ou outra qualquer;
b) Os materiais usados são o aço e o concreto.

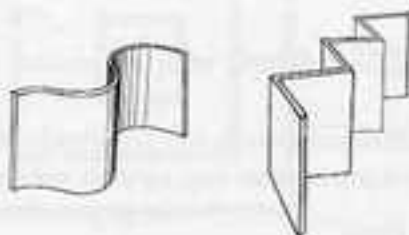
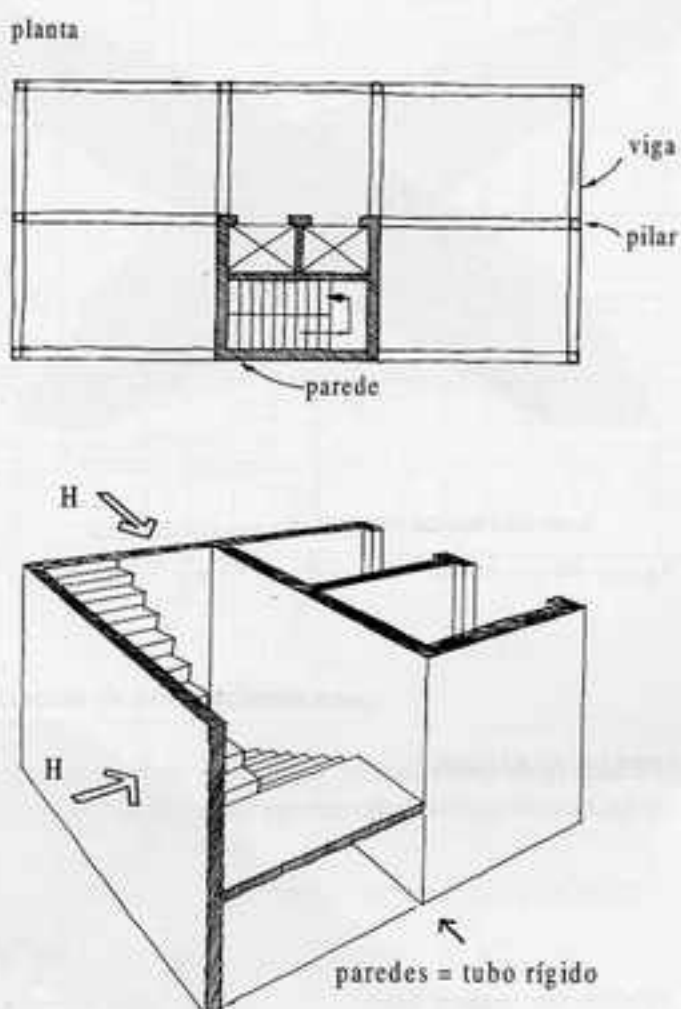
Associação pilar x pilar

Associação discreta

São muitas as possibilidades de associação pilar x pilar, desde as mais simples às mais complexas.
A associação de dois ou mais pilares que se abrem em V é das mais comuns; tem como objetivo principal diminuir os vãos da viga que sustentam, fora obviamente os aspectos formais e de uso dos espaços.

Pode-se associar dois ou mais pilares objetivando, com o conjunto, obter um pilar único e mais rígido.

Pode-se associar dois ou mais pilares na forma de um V invertido, objetivando o enrijecimento do conjunto estrutural.

Pode-se associar, com auxílio de vigas, pilares pouco espaçados, para que formem um pseudo tubo que sirva para travamento de edifícios muito altos.

Outras possibilidades, mais complexas, podem ocorrer quando pilares mais robustos são subdivididos gradativamente em outros pilares de menores dimensões.
Essa solução visa a diminuição dos vãos da estrutura sustentada, sem adensamento de pilares na base.

Associação contínua

A associação contínua de pilares infinitamente próximos resulta em lâminas verticais denominadas paredes.
Em termos de comportamento, as paredes podem, em princípio, ser comparadas aos pilares, podendo sofrer compressão e flambagem, por cargas verticais, e flexão, por cargas horizontais.

As paredes podem ter sua rigidez aumentada por meio de curvaturas e de dobraduras.

As paredes são muito úteis no travamento vertical de edifícios. Normalmente, são usadas para isso as paredes de escadas e de elevadores.

Considerações gerais

a) Essa é uma associação que permite soluções formais inesperadas e instigantes;
b) Os materiais que podem ser utilizados são o aço, o concreto, a madeira e até a própria alvenaria.

ÚNICO ANDAR

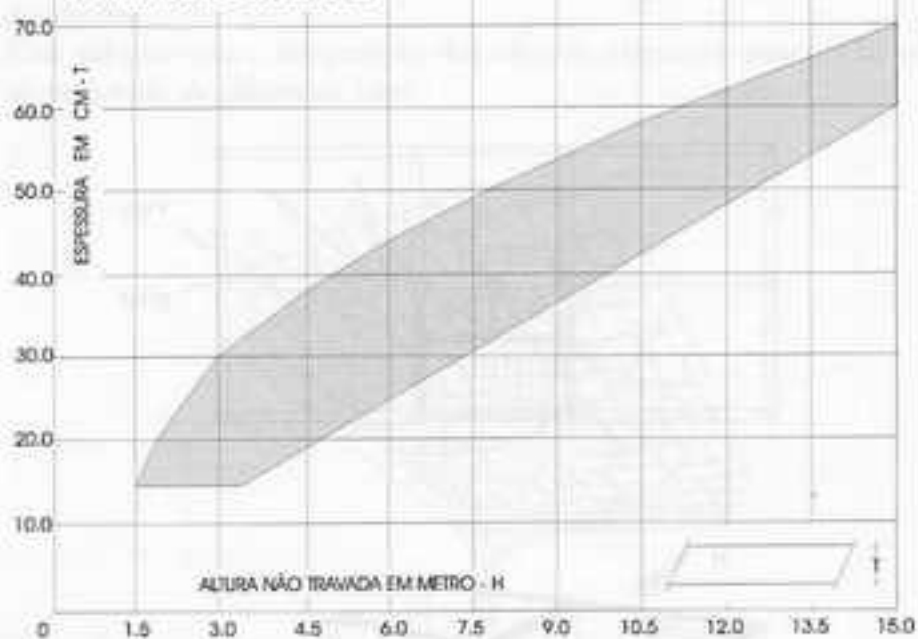
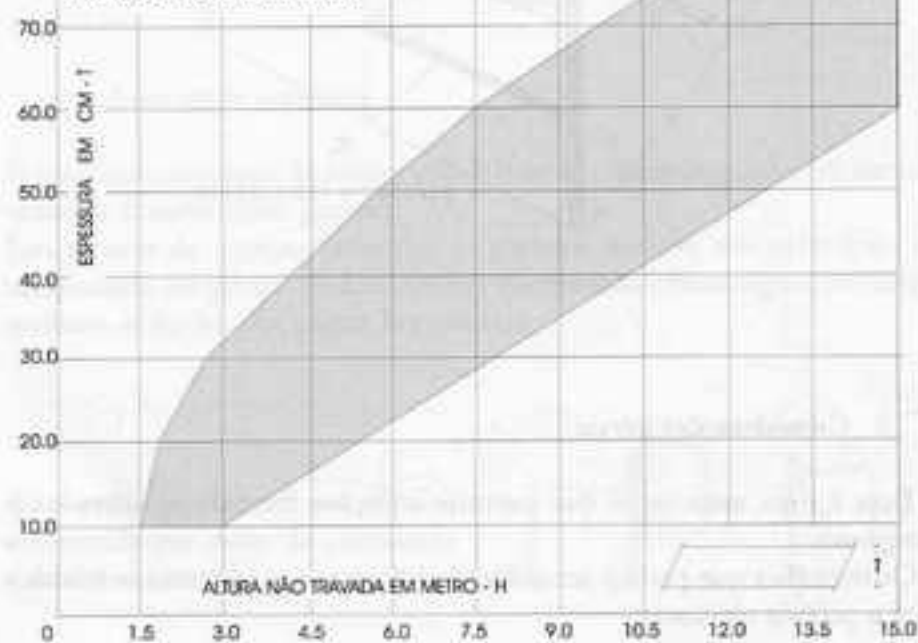
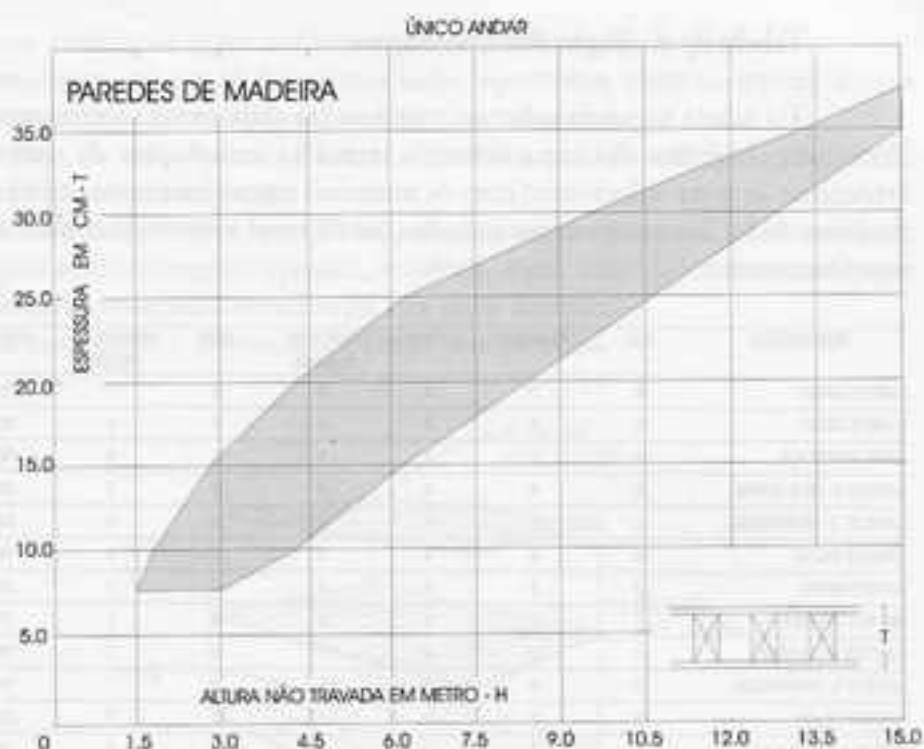
PAREDES DE MADEIRA

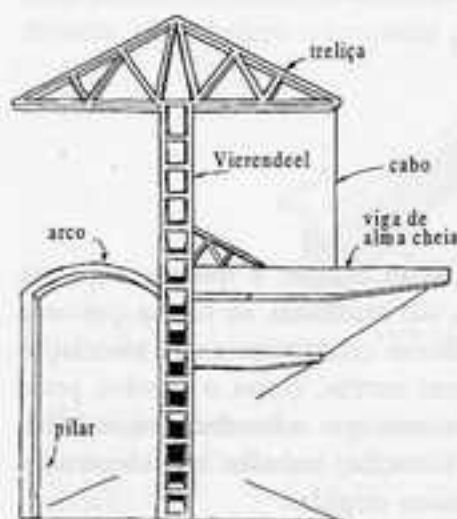
ESPESSURA EM CM - T

ALTURA NÃO TRAVADA EM METRO - H

35.0 30.0 25.0 20.0 15.0 10.0 5.0 0

1.5 3.0 4.5 6.0 7.5 9.0 10.5 12.0 13.5 15.0

T

Associações de associações

Foram mostradas, nos itens anteriores, as possibilidades de associação entre pares de sistemas estruturais básicos, ou seja, as associações mínimas.

Outras podem ser criadas, como a associação de vigas de alma cheia com pilares e cabos, ou ainda cabos com arcos, vigas de alma cheia e pilares, entre outras.

As associações de associações é só limitada pela imaginação e criatividade de cada um.

Tabela de avaliação das associações

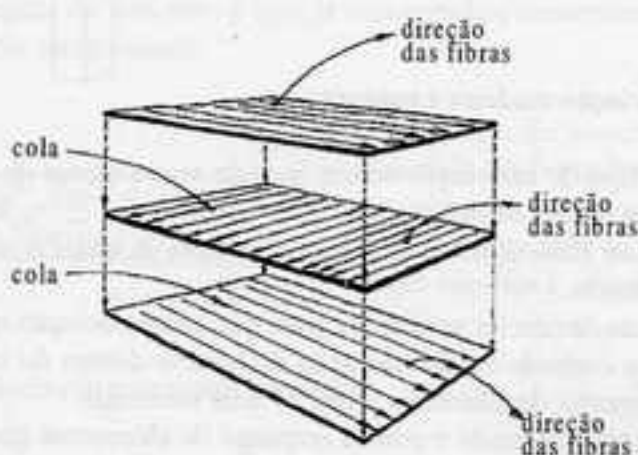
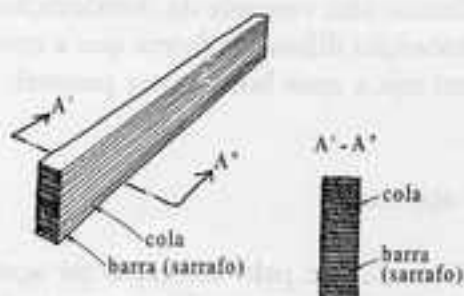
Tal tabela segue os mesmos critérios das elaboradas anteriormente. Tem como objetivo dar uma visão de como as associações de sistemas estruturais se inter-relacionam com os materiais estruturais mais utilizados. As notas de 1 a 5 correspondem às avaliações de ruim a ótimo, já comentadas anteriormente.

ASSOCIAÇÃO	AÇO	CONCRETO	MADEIRA	VARIEDADE FORMAL	VÃO	VERSATIL. DE USO	TOTAL
CABO X CABO	5	2	2	5	5	1	20
CABO X ARCO	5	4	3	4	4	1	21
CABO X TRELIÇA	5	1	3	3	3	3	18
CABO X V. DE A. CHEIA	3	4	3	3	4	3	20
CABO X V. VIERENDEEL	4	4	1	3	3	3	18
CABO V. PILAR	5	3	3	3	1	3	18
ARCO X ARCO	4	5	4	4	4	1	22
ARCO X TRELIÇA	5	2	4	2	3	1	17
ARCO X V. A.CHEIA	4	5	4	2	3	1	19
ARCO X V. VIERENDEEL	4	4	1	3	3	1	16
ARCO X PILAR	5	5	3	2	3	3	21
TRELIÇA X TRELIÇA	5	1	3	4	4	2	19
TRELIÇA X V. A. CHEIA	5	1	4	3	3	5	21
TRELIÇA X V. VIERENDEEL	5	1	2	3	3	5	19
TRELIÇA X PILAR	5	1	5	3	3	5	22
V. A. CHEIA X V. A.CHEIA	4	5	4	4	4	5	26
V.A.CHEIA X V. VIERENDEEL	4	4	2	3	3	5	21
V. A. CHEIA X PILAR	5	5	5	3	3	5	26
V. VIERENDEEL X V. VIERENE	5	4	1	3	3	4	20
V. VIERENDEEL X PILAR	5	4	2	4	3	4	22
PILAR X PILAR	5	5	4	4	3	3	24

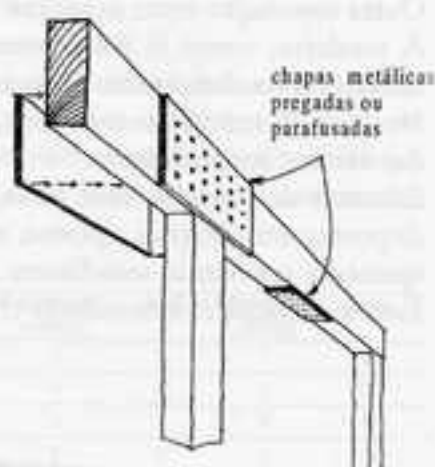
Associação de materiais

Associação madeira x madeira

Uma das maneiras dessa associação ocorrer é quando espécies diferentes, com particularidades diversas, são utilizadas, de forma que cada espécie comporte-se dentro de suas melhores características. A associação entre madeiras de árvores frondosas com outras, como o bambu, pode resultar em soluções adequadas, fazendo com que o bambu, graças à sua grande deformabilidade e resistência à tração, trabalhe em elementos estruturais em que essas propriedades sejam exigidas.

Outra associação entre madeiras ocorre na execução de placas.
A madeira, como já foi comentado, apresenta características muito diferentes, na direção das fibras e na normal a elas.
No caso da resistência mecânica, a madeira quando solicitada na direção das fibras é mais eficiente.
Lâminas de madeira bem finas, coladas umas às outras, com as fibras dispostas em direções opostas, resultam num material interessante que apresenta resistência semelhante nas duas direções.
Essa associação é denominada chapa compensada.

Uma terceira associação entre madeiras se dá pela colagem de barras, umas sobre as outras. Essas barras, após coladas, são prensadas, o que garante boa ligação entre as fatias.
Essa associação recebe o nome de viga laminada ou arco laminado, já que durante a prensagem o conjunto pode ser curvado na forma de um arco.

Obtém-se elementos estruturais capazes de vencer grandes vãos, o que não é possível com as barras de madeira beneficiadas encontradas no mercado.

Associação madeira x aço

Essa associação é usada quando se quer aumentar a resistência de um elemento estrutural de madeira, ou quando se deseja reforçar uma estrutura já existente.

Associação madeira x concreto

Esse tipo de associação ocorre quando se usa barras de bambu, em substituição às barras de aço, no concreto armado.
O bambu, neste caso, absorve as forças de tração, às quais o concreto não oferece resistência.
Dois problemas devem ser resolvidos, para que essa associação seja possível: a primeira é o controle da deterioração do bambu dentro do concreto e a segunda, a garantia de aderência entre os dois materiais.
Com tratamento adequado e com o emprego de elementos que permitam uma melhor ligação entre o concreto e a madeira, essa associação pode apresentar aplicações práticas.
Outro tipo de associação entre madeira ou, mais genericamente, entre fibras vegetais e concreto encontra-se em pesquisa e ainda não tem uso generalizado: fibras, como as do coco ou da juta, adicionadas difusamente ao concreto dão a este características de resistência à tração em todas as direções.
Os problemas a enfrentar são: controle da deterioração das fibras vegetais e adequação da distribuição difusa, de forma que a concentração de fibras na massa de concreto seja a mais homogênea possível.

Associação aço x aço

Essa associação ocorre pela utilização de aços de características diferentes, principalmente no que se refere à resistência.
Quando é muito resistente, não é boa solução utilizar o aço em peças comprimidas: por causa da sua maior resistência, tem-se peças muito esbeltas, sujeitas, por outro lado, a maiores possibilidades de flambagem.

Os aços mais resistentes devem ser usados para peças tracionadas, como tirantes, nas quais tal característica representa, sem dúvida, uma vantagem.

Associação aço x concreto

Uma associação deste tipo, largamente conhecida e utilizada, é o concreto armado.
As suas características já foram anteriormente discutidas na apresentação dos materiais estruturais básicos.
As vigas mistas de concreto e aço, já comentadas, constituem uma forma de associação muito usada.

Outro tipo de associação desses materiais, ainda em fase de pesquisa, é a armadura difusa, semelhante àquela já mostrada na associação de fibras vegetais e concreto.

Associação concreto x concreto

Essa associação ocorre em situações muito particulares, quando concretos de resistências diferentes são utilizados na mesma obra. É o caso do emprego concomitante de concreto armado em pilares e de concreto protendido em lajes e vigas.
O concreto usado no protendido é normalmente mais resistente do que o usado no armado.

CAPÍTULO 4

Sistemas Estruturais para Suporte de Vedações

Normalmente, é dada pouca importância à estrutura de suporte das paredes de vedação dos edifícios. Entretanto, quando a área torna-se muito grande deverão ser tomados cuidados especiais, pois os elementos de suporte desses grandes panos terão dimensões tão significativas que, fatalmente, participarão dos resultados formais da arquitetura.

As vedações são submetidas, basicamente, a dois tipos de carregamentos: o carregamento vertical, em virtude do seu peso próprio, e o horizontal, em conseqüência das forças do vento.

Para o peso próprio, as soluções estruturais são singelas, bastando o uso de uma viga que vença o vão entre os apoios (pilares ou elementos de fundação), podendo não apresentar qualquer interferência nos aspectos formais.

No caso das cargas de vento, a situação torna-se mais delicada: as forças horizontais são mais difíceis de ser transmitidas aos apoios, que normalmente são verticais.

Duas são as formas de absorver as cargas horizontais nas vedações: ou incorpora-se a vedação aos pilares da edificação ou cria-se todo um sistema estrutural independente.

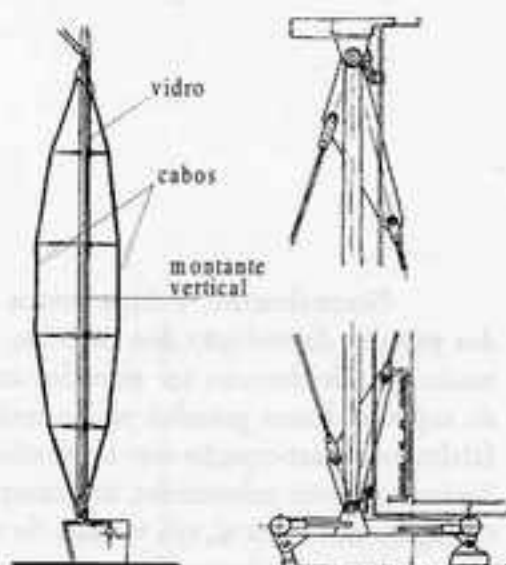
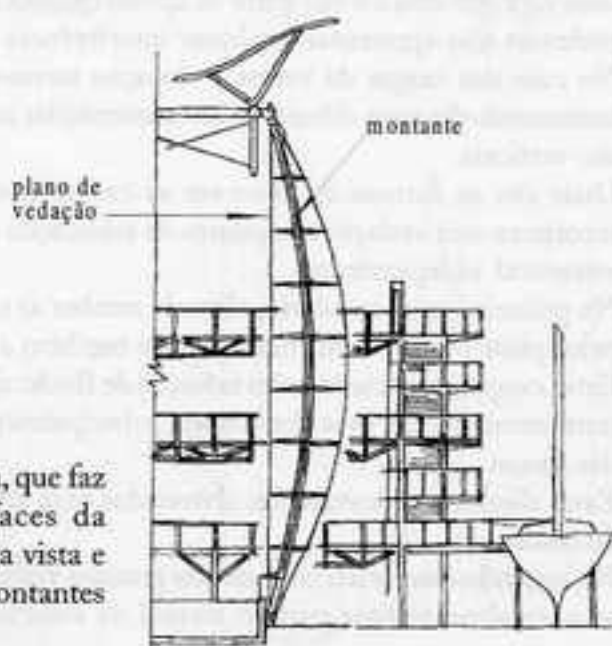
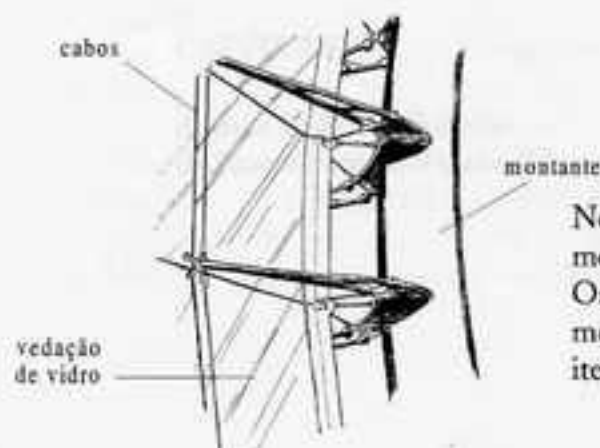
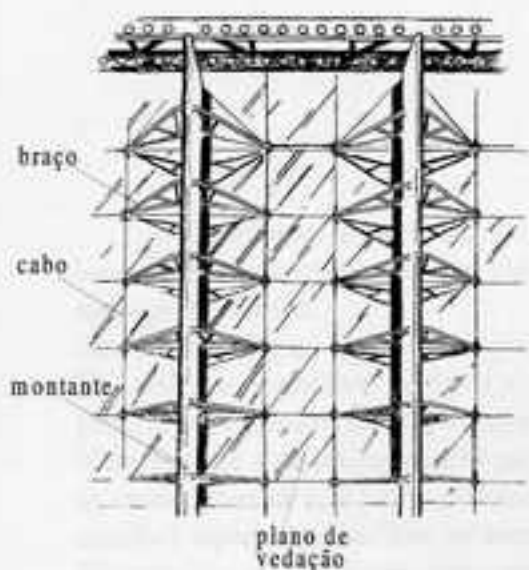
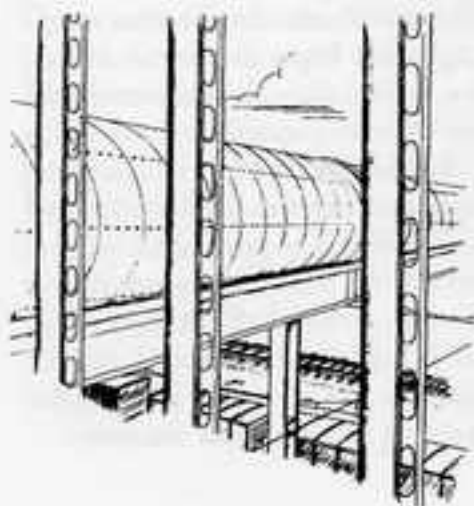
No primeiro caso, os pilares, além de receber as cargas verticais transmitidas pelos pisos e pelas coberturas, passam também a receber cargas horizontais. Estas cargas provocarão neles esforços de flexão significativos, o que resultará num aumento em suas dimensões, principalmente na direção da aplicação das forças.

Essas dimensões deverão ser absorvidas pela arquitetura, notadamente nas fachadas.

No segundo caso, mais comum nas grandes vedações envidraçadas, procura-se normalmente tirar partido formal da solução estrutural.

Neste caso, duas são as soluções mais comuns:

a.- Criam-se montantes verticais, normalmente metálicos, nos quais os vidros são apoiados; como já foi dito, os esforços de flexão são muito elevados, o que resultaria em montantes de grandes dimensões, esteticamente pesados e conflitantes com a transparência dada pelo vidro.

Para torná-los mais leves, usa-se o vagonamento do montante, ou seja, usam-se cabos ligados aos montantes por barras rígidas que, ao mesmo tempo em que diminuem o comprimento de flambagem do montante (para as cargas verticais em virtude do peso próprio do fechamento), absorvem as trações provocadas pelos momentos fletores (em conseqüência das forças do vento).

b. - Solução mais sofisticada, que faz com que, em uma das faces da vedação, a estrutura não seja vista e prevê o afastamento dos montantes do plano da vedação.

Neste caso, a vedação é fixada ao montante por braços horizontais. Os montantes são vagonados da mesma forma como explicado no item a.

Para não serem severamente solicitados, os braços podem ser atirantados, nas suas extremidades, em cabos verticais fixados no topo em algum elemento rígido da estrutura da edificação.

Os montantes, em lugar de vagonados, podem ter seu corpo principal de alma cheia, em treliça ou de Vierendeel.
Dependendo de suas dimensões, as soluções em treliça e Vierendeel são as mais condizentes com a transparência desejada.

CAPÍTULO 5

Alguns Critérios Práticos de Lançmento de Vigas e Pilares

Denomina-se "lançamento de vigas e pilares" o procedimento de locar, sobre a arquitetura, as vigas e pilares resultantes da concepção estrutural adotada.

Não existem regras definitivas e precisas para o "lançamento" da estrutura. No máximo, é possível propor alguns critérios que sirvam de ponto de partida para a materialização dos componentes estruturais.

Nem sempre a primeira solução proposta é a melhor. É recomendável que se tentem outras e, a partir de uma hierarquia de pré-requisitos, se possa escolher aquela que melhor os atenda.

Recomenda-se que as tentativas sejam registradas em papel manteiga, que permite desenhar diretamente sobre a planta de arquitetura.

Quem estiver familiarizado com as ferramentas do desenho por computador poderá, em vez do papel manteiga, utilizar "layers" de estudo.

Eles permitirão desenhar sobre o arquivo eletrônico da arquitetura todas as tentativas de "lançamento". O lançamento da estrutura pode ser iniciado por qualquer nível da arquitetura.

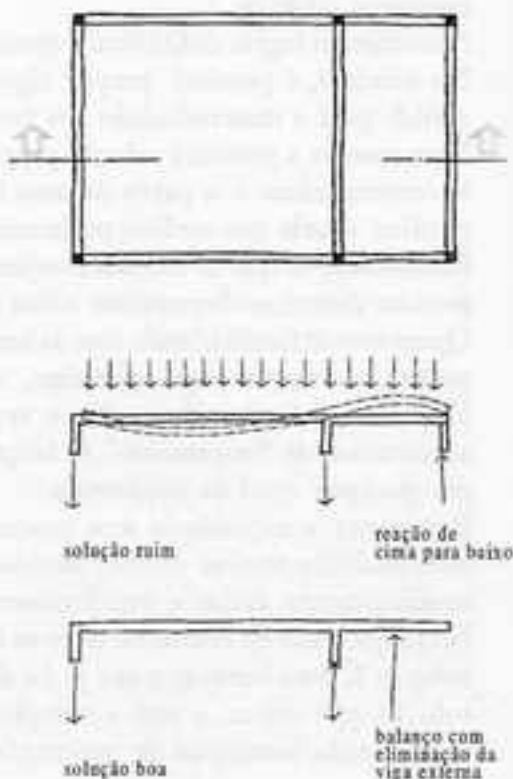
Entretanto, a experiência tem mostrado que começando pelo pavimento intermediário tem-se melhor domínio dos reflexos sobre os pavimentos imediatamente abaixo e imediatamente acima.

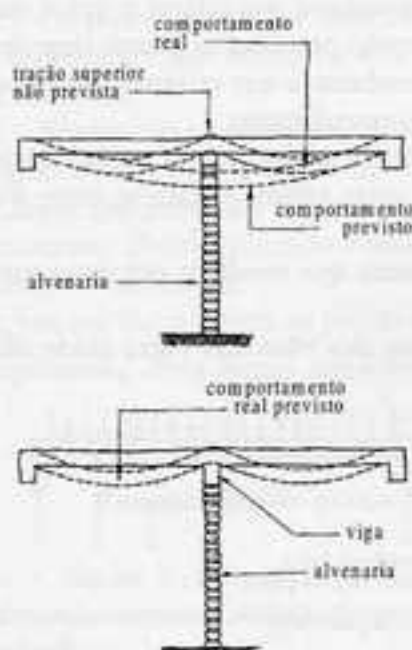
No lançamento da estrutura, deve-se evitar a angústia de procurar a melhor solução. É bom lembrar o que já foi dito no início deste trabalho: a melhor solução não existe, e sim a solução ou as soluções que atendem bem determinada hierarquia de pré-requisitos.

Normalmente, a tendência de quem lança a estrutura é começar pela locação dos pilares. O início pela locação dos pilares pode provocar uma grande indefinição. Os pilares podem ser locados em qualquer número e, excetuando-se as aberturas, em qualquer posição. Como o caminho natural das forças passa antes pelas vigas e depois, através delas, chega ao pilares, é também natural que o lançamento da estrutura se dê a partir das vigas.
Para orientar as tentativas de lançamento, seguem-se alguns critérios objetivos de locação de vigas e de pilares:

Locação de vigas

a.- As vigas devem ser locadas de forma que os panos de lajes resultem com dimensões da mesma ordem de grandeza. Panos de lajes de tamanhos muito diferentes apresentam dois inconvenientes: em razão dos vãos diferentes, as lajes necessitam de espessuras diferentes. Isso tende a dificultar o processo construtivo. Se se adota uma única espessura, a estrutura fica superdimensionada e antieconômica. O segundo inconveniente encontra-se no próprio comportamento das lajes, como mostra a figura abaixo;

Como se pode observar, quando carregadas, a laje de vão menor tende, por influência da laje de vão maior, a ser submetida apenas a momentos fletores negativos, provocando na viga que a apoia uma reação de baixo para cima.
Nesta situação, a viga torna-se mais um elemento de ancoragem do que de apoio.
A eliminação da viga extrema, deixando a laje de menor vão em balanço, é mais eficiente, inclusive do ponto de vista construtivo, pois a sua eliminação facilita a execução das fôrmas e das armações;

b. sempre que possível, as vigas devem ser locadas sob as alvenarias. Como a viga é mais rígida do que a laje, em virtude da sua maior espessura, as deformações que sofre são menores quando solicitada pela carga da alvenaria.
Desta forma, evitam-se trincas indesejáveis, como mostra a figura ao lado.

Quando não for possível atender a este critério, pode-se prescindir de uma nova viga se a alvenaria estiver distanciada do bordo da laje menos de ¼ do seu vão. Nesta posição, a laje é mais rígida e os efeitos das deformações podem ser desprezados;

c. sempre que possível, as vigas devem ser locadas sobre as alvenarias.
Com este procedimento, evita-se que as lajes se apoiem indevidamente nas alvenarias, introduzindo esforços não previstos no seu dimensionamento.

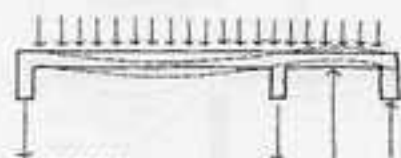
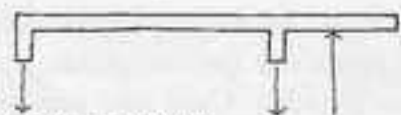
Pela figura anterior, é possível ver que, com o uso da viga sobre a alvenaria, já se previa esse apoio no cálculo, armando-se a laje contando com os esforços aí originados. Caso não seja possível lançá-la sobre a alvenaria, é recomendável que a viga seja executada depois de a laje ter sofrido as maiores deformações. Se a alvenaria estiver distanciada do bordo da laje de menos de ¼ do tamanho do vão da laje, pode-se prescindir de uma nova viga. Nesta posição, as deformações da laje são pequenas e o efeito de apoio é desprezível;

d. sempre que o uso de uma viga interferir esteticamente no espaço onde ela se projeta, pode-se invertê-la, isto é, colocar a laje na face inferior da viga. A viga invertida apresenta o mesmo comportamento da viga normal, não necessitando de tratamento especial.

Locação de pilares

a. -Em qualquer edificação, em princípio, é suficiente a colocação de apenas um pilar. Não é difícil imaginar que uma solução que contemple apenas um pilar torna a estrutura muito mais complexa e cara.
O número de pilares para sustentação de um edifício deve ser dosado, de maneira que a estrutura seja de fácil execução e economicamente viável.
A quantidade de pilares em um espaço pode afetar psicologicamente os usuários. Estudos mostram que, em saguões de espera de grandes espaços abertos, as pessoas tendem a se agrupar próximas aos pilares e que a sua escassez pode provocar até mal-estar. A opção por poucos pilares deve ser muito bem avaliada e adotada quando embasada em critérios técnicos, econômicos e, por que não dizer, também psicológicos;
b. em obras de médio e pequeno porte, inclusive edifícios altos, a experiência mostra que os espaçamentos econômicos entre pilares situam-se entre 4 e 6 metros;
c. - Os pilares devem ser locados de maneira que resultem em vigas com vãos de mesma ordem de grandeza.
Diferenças de até 20% nos comprimentos dos vãos das vigas ainda são econômicas.

Quando os vãos são muito diferentes, pode ocorrer o que mostra a figura ao lado.

Quando a viga é carregada, seu maior vão tende a fazer com que o menor seja submetido apenas a momentos negativos. Desta forma, o pilar extremo do menor vão da viga comporta-se a tração, como um tirante e não como um pilar convencional.

Em tal situação, é preferível a eliminação do pilar extremo, criando-se um balanço, tornando a execução mais simples e a estrutura mais econômica;

d. - Sempre que possível, os pilares devem ser locados de forma que se criem balanços que possam aliviar o vão central, conduzindo aos menores esforços.

A figura ao lado mostra as relações econômicas entre balanços e vãos centrais das vigas;

e. - Os pilares devem ser posicionados sem descontinuidade, da fundação à cobertura. Com isto, evita-se o uso de vigas de transição, que encarecem a estrutura;

f. - Sempre que possível, os pilares devem ser locados nos encontros das vigas. Com este procedimento, evita-se que vigas apoiem-se sobre vigas. Cargas concentradas sobre as vigas tendem a aumentar a solicitação ao momento fletor, exigindo maiores dimensões e, portanto, tornando-as menos econômicas;

g. sempre que possível, os pilares devem ser locados sobre os mesmos eixos, facilitando, desta forma, sua locação em obra.

Recomendações gerais

a. - Após o lançamento da estrutura, procede-se ao seu pré-dimensionamento, utilizando tabelas e gráficos, como os apresentados neste trabalho.

O pré-dimensionamento dos elementos estruturais é importante para se ter a noção das dimensões e do seu relacionamento com os espaços arquitetônicos;

b. - Sempre que possível, devemos evitar grande variedade nas dimensões dos elementos estruturais, visando a uma maior facilidade na execução; três dimensões diferentes para vigas e pilares é um número bem razoável.

CAPÍTULO 6

Analogias entre Sistemas Estruturais da Natureza e das Edificações

Introdução

Uma das formas mais eficientes de aprendizado é através da observação do que existe. E, de todas as coisas que existem ao nosso redor, a natureza é, sem dúvida nenhuma, a mais agradável de estudar.
Ademais, a natureza é também um bom exemplo de como os problemas estruturais podem ser resolvidos, visando à estética, à economia e à funcionalidade. Em outras áreas do conhecimento humano, o estudo sério de como a natureza resolve seus problemas de subsistência tem levado o ser humano a inventar, ou melhor, a reproduzir soluções naturais, construindo os mais diversos tipos de objetos úteis para nossa existência.
Infelizmente, nas áreas da arquitetura e da engenharia civil, essas analogias são vistas com certa desconfiança e, por isso, muitas das soluções formais e estruturais que a natureza nos apresenta são simplesmente desconsideradas.
Uma das exceções dessa situação é o estudo que vem sendo desenvolvido pelo arquiteto Frei Otto e seus colaboradores, no Instituto de Estruturas Leves, em Stuttgart. Lá, é comum a procura por analogias entre as possibilidades construtivas nas edificações e bolhas de sabão, ossos, teias de aranha, entre outras. A própria eletrônica desenvolveu uma ciência chamada Biônica, para a construção de sistemas a partir de analogias com seres vivos.
Para mostrar a importância do estudo dessas analogias, seguem-se alguns exemplos de resultados obtidos em várias áreas da atividade científica:
- Pesquisando o vôo das moscas, que conseguem manter-se em equilíbrio, mesmo voando de maneira desordenada, descobriu-se um giroscópio, do tamanho aproximado de uma pilha, que é usado em mísseis para a manutenção da sua rota;
- Estudando a pele dos golfinhos, os cientistas idealizaram um material elástico para revestimento de submarinos;
- Com base no comportamento do besouro, foi construído um olho artificial de duas faces, que calcula a velocidade de traços luminosos em movimento, o que resultou num aparelho que possibilita medir a velocidade de aviões;
- O caracol serviu de modelo para a construção de um aparelho que acentua automaticamente os contrastes, na televisão e no radar;
- Estudando a forma de orientação dos morcegos, os cientistas criaram o radar;
- As abelhas podem-se orientar pelo sol, mesmo em dias nublados.

A partir dessa constatação, foi possível construir uma bússola celeste de luz polarizada, capaz de determinar a posição do sol, qualquer que seja o tempo. Muitas outras realizações humanas foram inspiradas por analogias com seres naturais; inúmeras pesquisas, algumas delas envolvendo as células, encontram-se em plena realização.

A preocupação com essas analogias não é tão recente, remontando ao ano de 1870, quando um dos seus principais mentores, o reverendo J. G. Wood, publicou estudos em que discutia a arquitetura animal.

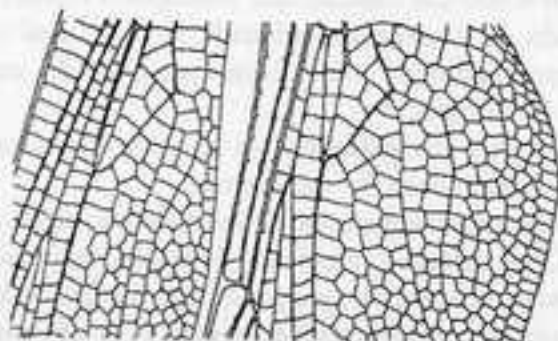
Por todas essas bem-sucedidas correlações é que o autor achou por bem chamar a atenção para mais essa fonte de inspiração para as concepções arquitetônicas e estruturais, aproveitando, ao mesmo tempo, para reforçar alguns conceitos estruturais já apresentados.

Os exemplos naturais são complementados com os de obras executadas pelos seres humanos, nas quais os mesmos conceitos são aplicados.

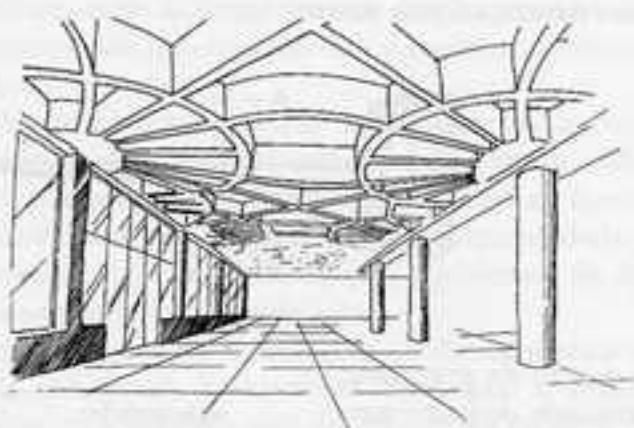
Analogias

A asa da libélula

A asa da libélula é um exemplo bastante evidente do conceito de estrutura como caminho das forças.

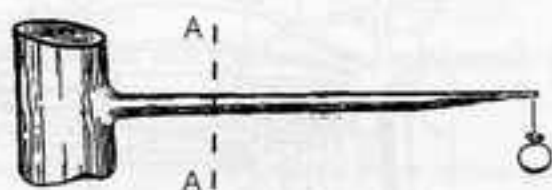
Pode-se ver, na figura, que a asa desse inseto é constituída de várias nervuras que vão aumentando de espessura conforme se aproximam do seu tronco. Note-se que onde a quantidade de caminhos é grande, ou seja, onde existe uma malha muito densa, a espessura dos seus componentes é bem pequena.

À medida que se aproxima do tronco do inseto, por uma necessidade funcional, a malha vai diminuindo e afunilando.

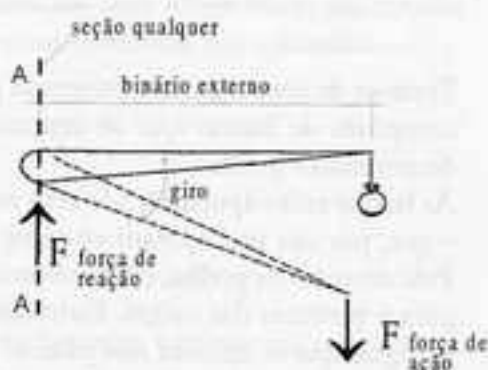
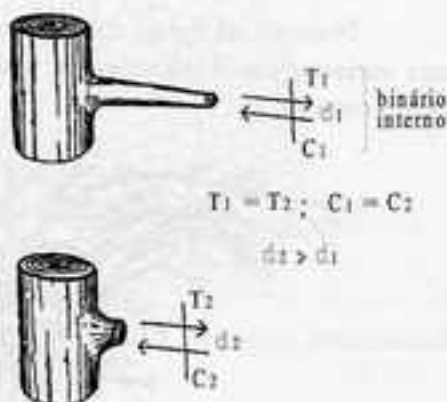
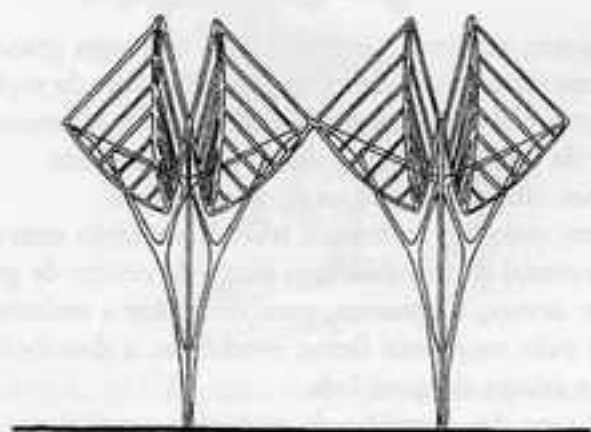
Observar ainda que, diminuindo a quantidade de caminhos, vão aumentando, no mesmo passo, as suas espessuras.

A figura a seguir mostra um exemplo, feito pelo homem, que obedece ao mesmo conceito.

Trata-se de uma estrutura projetada por Nervi para o edifício Hall of Labor, composta de barras que se cruzam, resultando num sistema estrutural denominado grelha.
As barras estão apoiadas, nos seus extremos, em outras - as vigas principais - que, por sua vez, apoiam-se sobre os pilares.
Pelo desenho da grelha, é facil observar a quantidade de caminhos oferecidos para o percurso das cargas. Entretanto, todos os caminhos convergem para as vigas, que se apoiam nos pilares.
As vigas se tornam então o único caminho para levar as cargas até os pilares. Em vista disso, elas são bem mais robustas do que as nervuras, como pode ser facilmente observado.

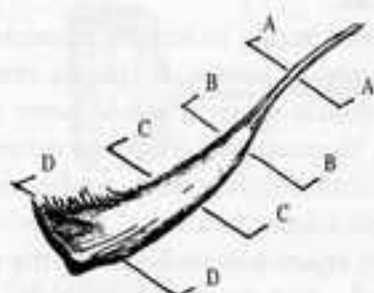
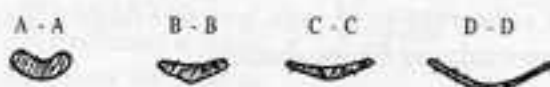
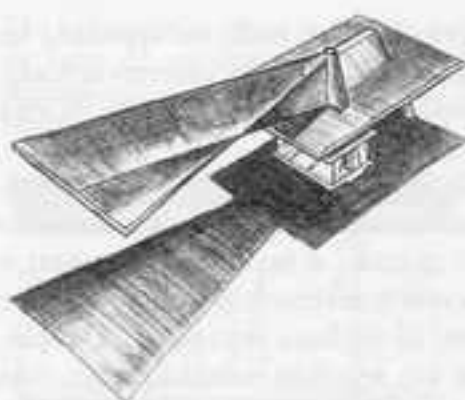
Os galhos das árvores frondosas

Note-se, na figura abaixo, que o galho desse tipo de árvore apresenta uma variação nas dimensões de suas seções, aumentando da extremidade para o tronco.

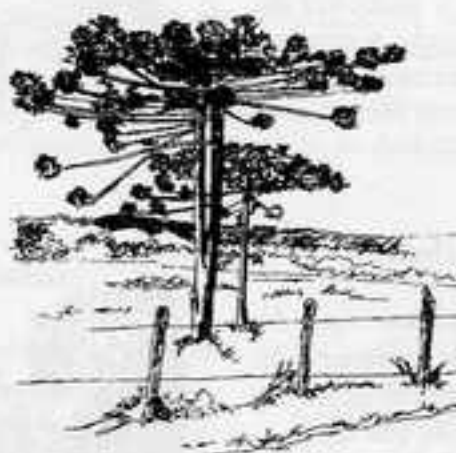
Tal variação tem uma razão estrutural de ser.
Para entender o que ocorre, suponha-se uma fruta pendurada no extremo do galho, como mostra a figura abaixo.

A fruta, sob a ação da gravidade, aplica à extremidade do galho uma força igual ao seu peso.
Considere-se, agora, uma seção qualquer afastada daquela em que se encontra a fruta.
Pode-se ver pela figura que, para que o equilíbrio se estabeleça, é necessário que internamente à seção considerada ocorra uma força igual e de sentido contrário ao peso da fruta (força cortante).
Essas duas forças - de ação e de reação - resultam num binário.

seção qualquer
A
binário externo
giro
F força de reação
A
F força de ação

É sabido que um binário provoca giro. De fato, o binário que ocorre no galho da árvore tende a provocar o giro da seção analisada, aplicando a ela um outro binário, agora interno: um par de forças que tende a tracionar as fibras superiores e a comprimir as inferiores.
O fenômeno, já estudado, denomina-se momento fletor.
Diz-se que o galho está submetido a flexão.

Outra constatação possível: quanto mais afastada estiver a seção analisada do ponto de aplicação da força-peso da fruta maiores serão os binários e, portanto, maiores serão as forças internas de compressão e de tração.
O galho é sempre do mesmo material, a madeira; a sua resistência é a mesma em todas as seções.
Se o galho tivesse a mesma seção, as tensões internas de compressão e de tração seriam maiores junto ao tronco do que na extremidade.
Neste caso, o material estaria sobrecarregado junto ao tronco, pondo em risco a sua estabilidade, ou pouco solicitado na extremidade.
Como a natureza procura resolver seus problemas da maneira mais econômica, essa não seria a solução ideal.
Para que todas as seções sejam solicitadas de forma praticamente igual, o que é mais desejável, a natureza aumenta a seção do galho proporcionalmente à intensificação do esforço, de tal sorte que o binário interno reativo tenha um braço maior (braço = distância entre as forças do binário), fazendo com que as forças de compressão e de tração mantenham-se dentro do limite de resistência da madeira da árvore.
Pode-se, neste caso, fazer uma analogia com obras realizadas pelo ser humano.
Considere-se a cobertura projetada por Santiago Calatrava para um restaurante, apresentada na figura abaixo.

A cobertura propriamente dita apoia-se num conjunto formado pela repartição dos pilares em diversas barras.
A intenção dessa solução é diminuir o vão a ser vencido pela estrutura da cobertura.
Cada braço do pilar comporta-se como um galho de árvore.
Neste caso, para se obter uma solução mais econômica, em termos de consumo de material, fez-se a sua seção variável ao longo do comprimento.

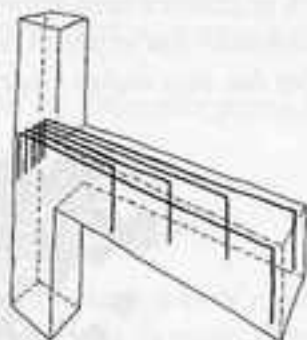
O galho da palmeira

A figura abaixo mostra o galho de uma outra espécie de árvore, a palmeira. A sua forma é bem diferente da do galho das frondosas.

Um exame atento indica que o galho da palmeira apresenta uma quantidade de material aproximadamente constante, da extremidade ao tronco. A palmeira conta com um mecanismo diferente para aumentar a resistência do galho ao momento fletor.
A figura abaixo mostra quatro cortes feitos em diferentes partes do galho.

O primeiro corte, próximo à extremidade, tem uma grande concentração de material nas vizinhanças do centro de gravidade da seção. O segundo e o terceiro cortes exibem seções com praticamente a mesma quantidade de material que da ponta, mas com distribuição diferente.
A folha, nesses últimos cortes, torna-se mais fina.
O quarto corte, próximo ao tronco, revela uma seção com espessura muito fina e com material distribuído bem longe do centro de gravidade.
Neste tipo de árvore, a natureza, para aumentar a resistência da seção ao giro causado pelo momento fletor, modificou a distribuição de material em relação ao centro de gravidade.
Lembrar que uma das maneiras de aumentar a resistência ao giro de uma seção é dobrando-a, fazendo com que o material se localize longe do centro de giro, ou seja, aumentando o seu momento de inércia.
O mesmo princípio é usado aqui pela natureza.
No extremo do galho, onde o esforço de giro é pequeno, a massa da seção se concentra junto ao centro de gravidade. Conforme aumenta a tendência de giro, ou seja, quanto mais se aproxima do tronco, mais o material vai-se afastando do centro. Em outra palavras: quanto mais próxima do tronco maior é o momento de inércia da seção do galho da palmeira.

Uma analogia com obras realizadas pelo ser humano pode ser apreciada na figura ao lado.
Ela mostra a marquise de entrada de uma obra projetada por Félix Candela.
Perceba-se como a seção transversal passa de uma lâmina reta, na extremidade, para outra bem curva, junto ao apoio.

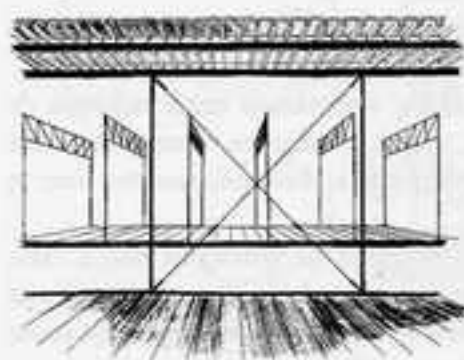
O galho da araucária

A araucária é uma árvore de galhos quase horizontais. Esses galhos diferentemente das espécies anteriores, não apresentam variação nas dimensões das suas seções e nem alteração na inércia.

Para resistir à variação de esforços ao longo do seu comprimento, a natureza criou um terceiro artifício: aumentar a resistência do material nas seções próximas ao tronco.
O nó de pinho, o ponto do galho próximo ao tronco, tem resistência mecânica muito maior do que o restante do galho.
Prova disso é a sua utilização em lareiras, pois oferece, também, maior resistência ao fogo. Em uma floresta de araucárias, pode-se observar que os galhos das árvores rompem-se sempre em seções longe do tronco.
Essa é, portanto, a terceira maneira de absorver o incremento de esforço: aumentando a resistência do material.

Uma analogia com obras realizadas pelo homem pode ser apreciada na figura abaixo. Tem-se uma viga em balanço, executada com concreto armado. Neste caso, por uma questão estética, optou-se por manter a seção da viga com as mesmas dimensões, da extremidade ao apoio.
Para resolver o problema do aumento do esforço junto ao apoio, aumentou-se a resistência do material. Para entender melhor como se dá o aumento de resistência numa viga de concreto armado, é necessário comentar o comportamento deste material. O concreto é um material muito resistente à compressão, tendo entretanto apenas 10 % dessa capacidade à tração. Para compensar tal deficiência, usa-se um segundo material, o aço, cuja resistência à tração é muito alta. Essa mistura de concreto e aço, quando a ligação íntima entre os dois materiais é assegurada, dá origem a um terceiro material: o concreto armado. Quanto mais armação recebe, respeitado o limite de resistência à compressão do concreto, mais resistente fica o concreto armado.

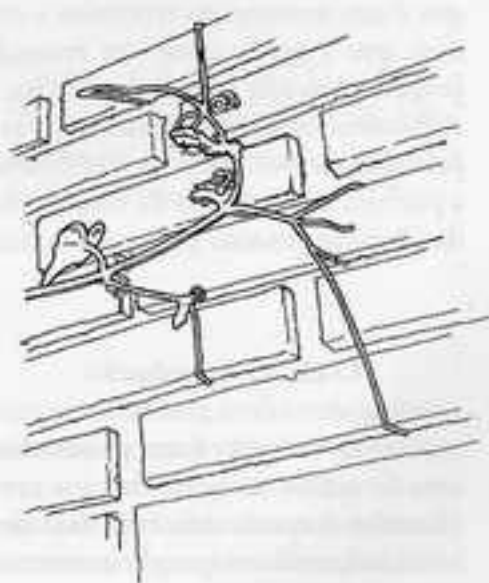
Portanto, numa viga em balanço, como a da figura, o aumento da resistência dá-se pelo aumento gradativo da quantidade de armação.

O galho do chorão

Os galhos desse tipo de árvore são muito finos, apresentando concentração de material junto ao centro de gravidade da sua seção.
Por isso, não apresentam rigidez ao giro, ficando praticamente pendurados no tronco.
É exatamente nesta característica que reside a sua beleza.
Os galhos, por não terem inércia, não podem absorver os esforços de flexão e nem mesmo os de compressão simples, suportando apenas a tração simples provocada pelo seu peso.

São inúmeras as obras realizadas pelo ser humano que ilustram o conceito de falta de rigidez da seção. Os travamentos de sistemas estruturais, denominados contraventamentos, constituem um exemplo muito claro e eloqüente.

A figura mostra o contraventamento vertical entre pilares de uma estrutura de aço.
Note-se que eles são constituídos de barras muito finas, para que não interfiram no aspecto visual.

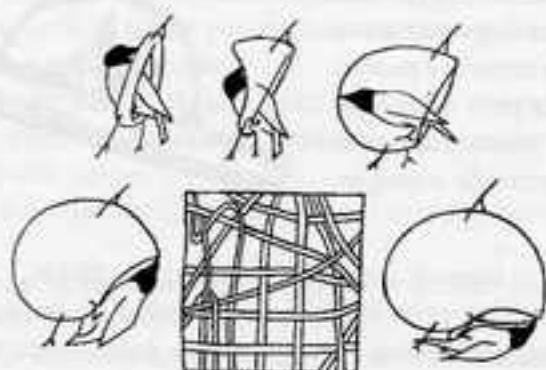
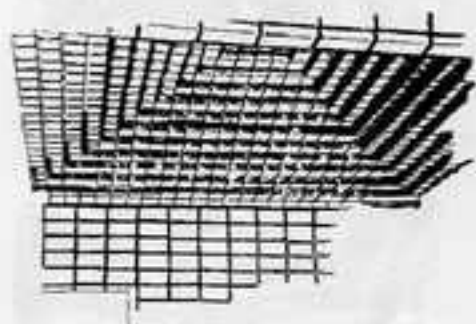
Normalmente, as barras de um contraventamento são dispostas em forma de X. Em princípio, seria lícito pensar que apenas uma das pernas desse X bastaria para travar a estrutura contra o deslocamento lateral dos pilares, o que teria fundamento, não fosse a baixa rigidez das barras.
Como nunca se pode prever em que sentido o deslocamento ocorrerá, se apenas uma barra fosse utilizada ela poderia sofrer compressão e, por ter pouca resistência a essa forma de esforço, deformar-se-a, prejudicando totalmente o travamento.
Por esta razão, recorre-se ao X, para que as barras estejam sempre sujeitas a tração simples, qualquer que seja o sentido de deslocamento da estrutura.

O pé de chuchu

Note-se, na figura, que o pé de chuchu é uma trepadeira.
Ao se fixar na parede apresenta, ao lado de hastes razoavelmente rígidas, hastes na forma de molas.
Essas molas permitem que a planta, quando exposta ao vento, possa sofrer considerável deformação sem o risco de se romper.
As ligações na forma de molas amortecem as vibrações provocadas pela ação do vento, impedindo que sejam totalmente absorvidas pela ligação haste x parede.

Se fossem todas rígidas, as hastes de fixação da planta à parede absorveriam integralmente os esforços causados pela vibração do vento.
Ao vibrar, seriam submetidas à alternância de esforços, rompendo-se facilmente.
Tal fenômeno é idêntico ao que faz um fio de arame romper-se quando submetido ao dobramento alternado, ora de um lado ora do outro.
Essa situação provoca, nas fibras do arame, alternância entre esforços de compressão e de tração; os materiais, nessas condições, apresentam um fenômeno denominado fadiga: rompem-se facilmente, mesmo sem a aplicação de um grande esforço.
Na obras executadas pelo homem, a ocorrência de vibrações não é rara. Estruturas que sustentam equipamentos que vibram ou que estão sujeitas a rajadas de vento podem vibrar. Se vibrarem na mesma freqüência da fonte emissora, podem entrar em ressonância com ela.
A ressonância é um fenômeno que ocorre quando determinado objeto sofre uma vibração externa, cuja freqüência é igual à sua freqüência própria.
Todos os elementos da natureza, em decorrência da sua forma, do material de que se constituem, e de outras propriedades, possuem uma capacidade intrínseca de vibrar.
Esse potencial de vibração denomina-se freqüência própria.
Para evitar que determinada estrutura entre em ressonância, quando excitada externamente, pode-se colocar amortecedores que absorvam a vibração ou, ainda, fazer com que a freqüência própria da estrutura seja diferente da freqüência da fonte emissora da vibração.
Quando um exército vai atravessar uma ponte, o comandante manda que a marcha seja interrompida e que cada um caminhe à vontade, pois a marcha, que é um movimento repetitivo e com determinada freqüência, pode fazer com que a ponte entre em ressonância, se porventura a sua freqüência própria coincidir com a da marcha.
A história bíblica relatando que as muralhas de Jericó foram destruídas pelo som de trombetas é cientificamente plausível, desde que tivesse havido a perfeita coincidência da freqüência própria da muralha com a freqüência da vibração emitida pelo som de milhares de trombetas.

O ninho do tinhorão

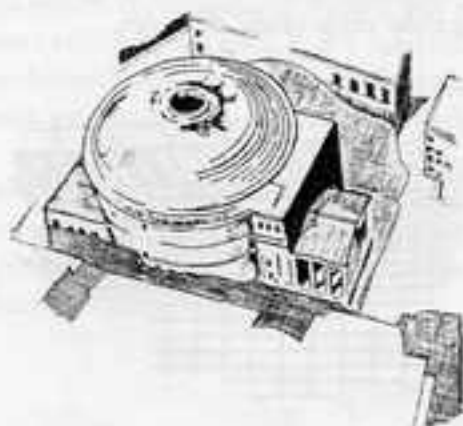
O tinhorão é um pássaro tecedor, que constrói o seu ninho sobre uma forquilha do galho de uma árvore.
O ninho é construído com fios de toda espécie, como capim seco, fios artificiais, enfim o que ele encontrar por perto.

O ninho do tinhorão tem uma entrada protegida da chuva e uma câmara de postura. O tinhorão tece os fios executando primeiramente a câmara de postura.

Após a execução dessa parte do ninho, a fêmea vem verificar se as condições são apropriadas para a postura e proteção dos ovos.
Havendo aprovação, o macho completa o ninho, executando a cobertura de proteção da entrada. Em caso contrário, abandona-o e inicia outro.
É ainda interessante notar que o tinhorão executa o ninho girando em torno do seu corpo que, assim, serve como gabarito.
Mesmo com o uso de fibras, um material que em princípio não é dos mais rígidos, o pássaro obtém um conjunto de boa resistência, suficiente para suportar o peso dos ovos e da fêmea.
Este é um exemplo típico de uma estrutura em que a correta disposição de elementos isolados, como frágeis fibras, pode resultar em um sistema com grande capacidade de carga.

Um exemplo de solução análoga, executada pelo homem, é vista na figura ao lado.

A partir de tijolos, dispostos de maneira que cada fiada tenha um pequeno balanço em relação à anterior, pode-se executar uma cobertura com um vão relativamente grande.
Observe-se que são executados anéis sempre maiores do que os vazios sobre os quais se projetam, o que obviamente não permite que caiam.

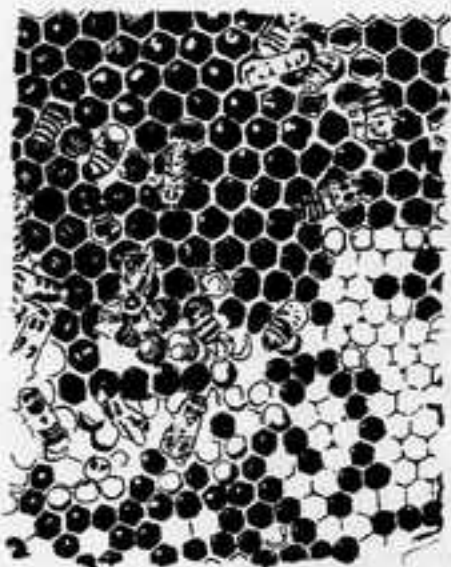
A casa do joão-de-barro

O joão-de-barro é um pássaro que costuma construir a sua casa sobre galhos de árvores e postes. A casa é construída pelo casal, que usa fibras vegetais misturadas com o barro úmido da beira de córregos.

Antes da aplicação, o barro é amassado e juntado às fibras.
A casa vai sendo erguida pelo depósito de bolinhas de barro sobrepostas.
Apresenta dois compartimentos: em um fica a antecâmara e no outro, a câmara de postura.
A forma final do ninho é a de uma cúpula, na qual, como se sabe, predomina o esforço de compressão simples; como o barro é um material que resiste bem a essa modalidade de esforço, seu uso torna-se adequado.
O joão-de-barro evidencia a interessante relação entre forma estrutural, esforço e material.
Se a concepção da estrutura parte do tipo de material disponível no local, o sistema estrutural a ser adotado deverá desenvolver esforços que sejam compatíveis com ele.
Se, ao contrário, a concepção parte do sistema estrutural, os esforços deverão ser bem conhecidos e o material deverá ser escolhido entre os que absorvam bem esses esforços.

Cobertura do Panteon de Adriano, construída em Roma por volta do ano 118 d.C.

Essa cobertura que representa o maior vão construído, na época, usa como material estrutural uma mistura de alvenaria e argamassa de cal e pozolana, com característica de boa resistência à compressão.
A forma em cúpula, utilizada pelos seus construtores, é adequada ao tipo de material disponível.

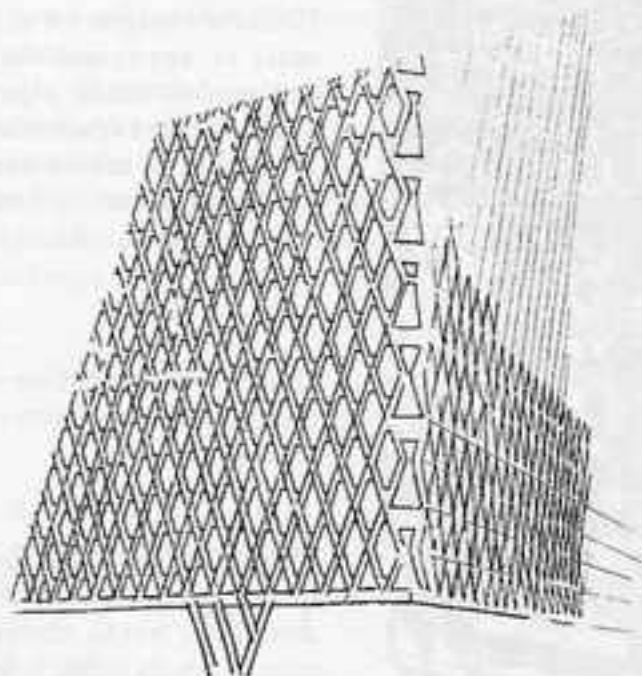
A colmeia das abelhas

As colmeias têm diversas apresentações. Podem ser construídas sobre uma superfície, estar penduradas em um galho, ou instaladas em qualquer outro apoio similar.
A construção do casulo é feita com uma cera segregada na barriga da abelha, que, com as patas, vai depositando o material, enquanto gira em torno do seu corpo.
A abelha, como o tinhorão, usa seu corpo como gabarito para construção de sua casa.
É interessante notar que, em vista do processo construtivo, a forma mais adequada do casulo seria a circular.
Entretanto, os círculos, ao serem agrupados, deixariam alguns intervalos entre si, o que significaria um consumo maior de cera.
As três únicas formas que, agrupadas, não deixam espaços perdidos são: o triângulo, o quadrado e o hexágono.

Como o hexágono é a forma que mais se aproxima do processo construtivo usado pela abelha e, entre as três citadas, a que apresenta a maior área com o menor perímetro, o hexágono foi a forma eleita.

Uma interessante observação é que cada colmeia apresenta casulos nas duas faces.

Os casulos são dispostos de forma que os que se encontram em uma das faces estão defasados em relação aos da outra; o fechamento do fundo dos casulos é feito por três losangos iguais.

O astrônomo Maraldi pesquisou diversos alvéolos, de várias partes do mundo, e mediu com muita precisão os ângulos desses losangos, chegando aos valores de 109°28' e 70°32'. Tal solução foi estudada pelo físico Reaumur e pelo geômetra Koening.

Este, por meio de cálculos matemáticos, chegou à conclusão de que, para obter a máxima economia de material, os ângulos executados pelas abelhas estariam errados em 2' .
Tempos depois, o geômetra Mac Laurin retomou os cálculos e verificou que Koening havia-se equivocado: o ângulo correto era o executado pelas abelhas.
Outra interessante constatação é que a membrana dobrada do fundo (maior momento de inércia, material longe do centro de gravidade da secção) aumenta a rigidez à deformação do casulo, quando apoiado ou pendurado.
É possível também observar que, para aumentar ainda mais a rigidez da forma hexagonal dos casulos, as abelhas aumentam a espessura junto aos nós, como que fazendo do hexágono um pórtico.
O enrijecimento dado pelas abelhas aos nós dos hexágonos, tornando-os mais estáveis e resistentes, também é utilizado pelo homem, como mostra a figura abaixo.

A parede estrutural em forma de losango, usada em um edifício da IBM, em Pittsburg, projetado por Curtis e Davis, tem a função de transmitir as cargas dos pavimentos superiores para os pilares do térreo. Essa transmissão só é possível porque os nós dessa malha são convenientemente enrijecidos, constituindo o que se denomina malha de quadros rígidos.

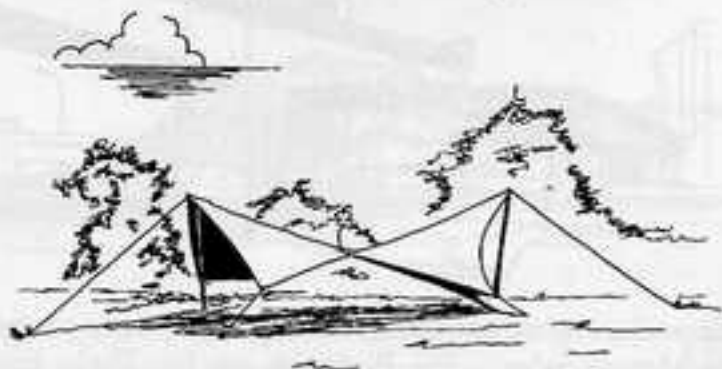
O casulo da lagarta

Antes de se tornar uma borboleta, a lagarta faz o seu abrigo em uma folha, que enrola em volta do próprio corpo, amarrando-a com fios por ela secretados.

As figuras mostram a seqüência de excecução do casulo.

A primeira parte da folha a ser dobrada é a mais larga e a que tem menor rigidez, pois, mantida a seção transversal, quanto mais longo for menos rígido será o elemento estrutural.

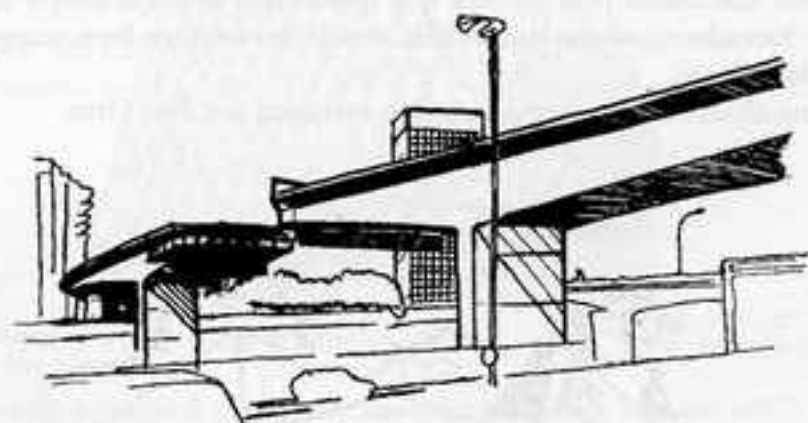
Outra observação interessante é que a folha, após ser tensionada pelos fios, torna-se mais rígida e, portanto, mais protegida.

As obras executadas pelo homem que apresentam analogia com o casulo são as chamadas estruturas tensionadas, ou seja, as estruturas leves compostas de cabos e lonas.
A figura abaixo mostra a primeira obra realizada por Frei Otto.

Trata-se de uma cobertura na forma de parabolóide hiperbólico, feita com lona e enrijecida com cabos.

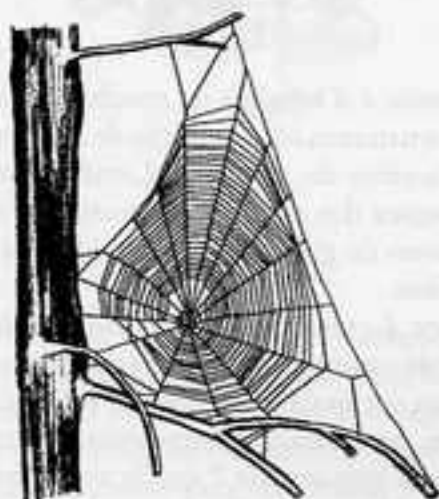
A casa do cupim

Os cupins habitam ninhos que constroem na madeira viva ou morta ou ainda sob o solo. Especialmente interessantes são os ninhos em forma de cômoros que se levantam do chão, feitos com terra misturada à saliva do inseto, sem contato direto com o solo.

Os cupins erguem uma parede muito resistente que envolve totalmente o ninho e é executada concomitantemente por duas frentes de trabalho..
No final, as duas frentes encontram-se no meio, ou seja, no topo do montículo formado pela parede.

O processo construtivo usado pelos cupins apresenta analogia com o de pontes de concreto protendido, inventado pelo brasileiro Emílio Baumgart, denominado processo dos balanços sucessivos. As pontes construídas por este método dispensam o uso de cimbramentos. A sua execução ocorre dos apoios para o meio do vão, em duas frentes de trabalho que se encontram no centro. O processo pode utilizar elementos pré-moldados, que vão sendo incorporados sucessivamente ao corpo da ponte, de ambos os lados. Esses pré-moldados recebem o nome de aduelas.

A figura acima mostra um exemplo de aplicação deste processo: a ponte Eusébio Matoso, sobre o Rio Pinheiros, em São Paulo, projetada pelo engenheiro Ernani Dias. Foi construída pelo processo dos balanços sucessivos e com concretagem "in-loco".

A teia da aranha

As aranhas constroem teias, armadilhas para a captura de presas que lhes sirvam de alimento. A exemplo da casa das abelhas, as teias são de construção geométrica. Os fios que as constituem - muito finos, com até um centésimo de milímetro - são secretados por algumas glândulas situadas no abdômen da aranha.
Para capturar os isentos, a aranha coloca-se no centro da teia.
A percepção do aprisionamento de algum deles é pela vibração.
Para localizar a sua presa, tateia os fios, procurando o mais esticado, onde deverá encontrá-la.

Na construção da teia, a aranha lança inicialmente fios radiais fixados em pontos rígidos.
Após lançar os fios principais, tece os anelares, até completar a malha.

Algumas obras executadas pelo homem seguem a geometria das teias, na direção dos esforços principais, tornando o sistema mais resistente e econômico.

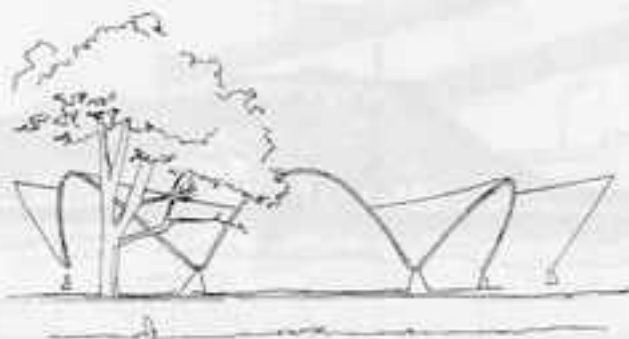
Na figura acima, tem-se uma cobertura de malha de cabos de aço, na qual a disposição dos cabos acompanha a geometria das teias.
Essa obra foi projetada por Frei Otto, em 1973, para a cobertura de um aviário, em Ludwigsburg, na Alemanha.

As conchas marinhas

As conchas marinhas abrigam moluscos que vivem sob a água, alguns a grandes profundidades. Em conseqüência da pressão provocada pela água, as conchas são submetidas a grandes esforços. Para melhor responder às severas solicitações, a natureza dotou-as de formas favoráveis.

A forma semelhante a uma cúpula permite o desenvolvimento de esforços predominantemente de compressão, aos quais o material da concha resiste bem, permitindo que a sua espessura seja bastante fina.

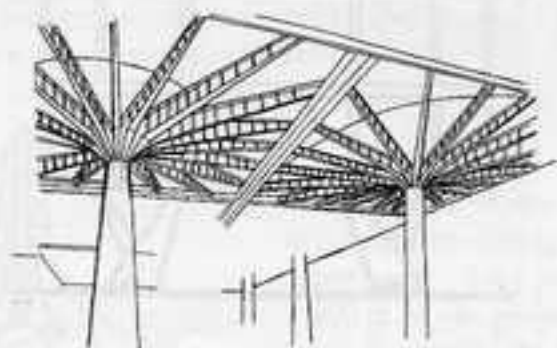
Por outro lado, os esforços de compressão e a esbeltez da concha podem causar flambagem, o que é resolvido pela natureza com a criação de nervuras que a enrijecem sem aumento significativo do seu peso. Lembrar que dobraduras aumentam a rigidez das seções dos elementos estruturais, ou seja, quanto mais material longe do centro de gravidade mais rígida será a seção e, portanto, mais dificill de flambar.

O concreto armado é muito resistente à compressão; por isso, formas estruturais em que prevaleçam esforços de compressão são economicamente interessantes para esse material. Por isso, a cúpula é um sistema estrutural perfeito para o concreto. Teoricamente, uma cúpula de aproximadamente 600 m de diâmetro poderia ser executada com apenas 7 cm de espessura. Na realidade, tal situação é inviável, pelo risco de flambagem devido à esbeltez da lâmina. Para aumentar a sua rigidez, podem ser criadas nervuras ou ondulações na casca, permitindo vencer grandes vãos com pequenas espessuras.

A figura acima mostra o exemplo de uma estrutura projetada por Félix Candela para um restaurante, no México. A casca vence, graças às suas dobraduras, um vão da ordem de 30 m, com apenas 10 cm de espessura.

O cogumelo

O cogumelo é um fungo que normalmente se desenvolve em áreas úmidas e pouco iluminadas; algumas espécies, na água. Os cogumelos apresentam diferentes formas, interessando discutir, neste trabalho, a do tipo não comestível, o amanita. Basicamente, esse cogumelo apresenta uma base, denominada volva, uma haste, denominada pé, e a parte superior, denominada chapéu. Chama a atenção a estrutura de sustentação do chapéu, formada por uma série de nervuras radiais, denominadas lamelas, que, apesar de esbeltas, são capazes de garantir a rigidez e a resistência do chapéu.

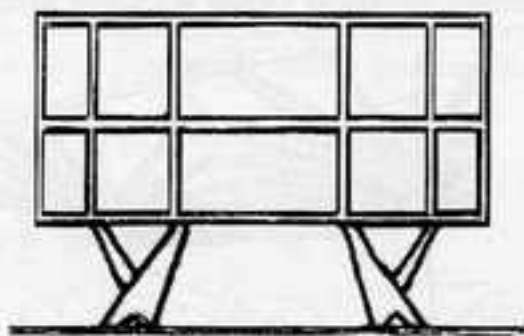
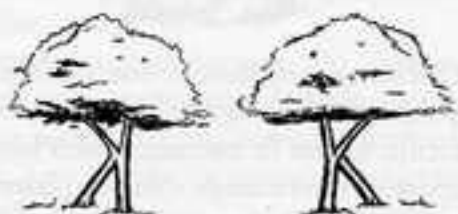
Note-se que as nervuras, por estarem em balanço em relação ao pé, têm altura variável, da extremidade para o apoio, o que dá ao chapéu a sua forma característica: mais fino nas bordas e mais espesso junto ao talo.

O homem apropriou-se dos mesmos princípios físicos que regem a estrutura do chapéu dos cogumelos e criou diversos tipos estruturais baseados nessa forma. O uso de estruturas com lajes - cogumelo (estruturas em que a laje apoia-se diretamente sobre os pilares, sem o uso de vigas) é muito comum, principalmente para coberturas; a inexistência de vigas facilita a execução da laje, principalmente quando as formas são muito irregulares.

Tendo em vista a distribuição dos esforços, a espessura da laje deve ser maior junto aos pilares e mais fina nas extremidades. É essa variação de espessura que a torna semelhante aos cogumelos naturais.
Para grandes vãos, a laje pode ser nervurada, o que a aproxima ainda mais da forma do cogumelo.

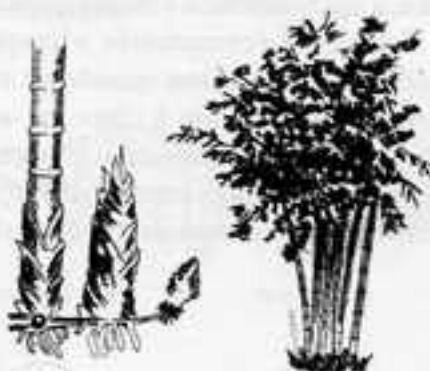
O pé de oliveira

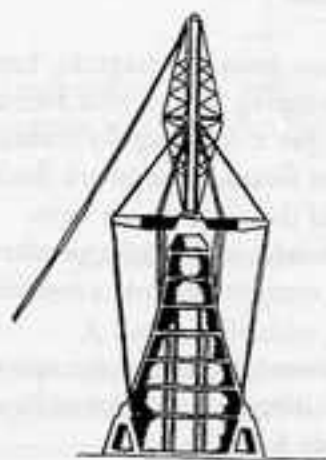
A oliveira é uma árvore muito resistente, germina em solos pobres e atravessa séculos produzindo.
Diferentemente da maioria, não cresce na vertical e tem o tronco muito sinuoso, o que tende a prejudicar a sua estabilidade.

Quando já velha, a estabilidade torna-se crucial: a partir de determinada idade, o seu tronco se reparte em dois, cada um desenvolvendo um sistema radicular próprio.
É como se houvesse duas plantas independentes que, com o passar dos anos, vão-se afastando.
É comum a ocorrência de árvores duplas, primitivamente próximas, que com o tempo podem separar-se cerca de dois metros.

Nesta última fase, passam a ter a configuração mostrada na figura abaixo, os troncos tomando a forma de um K, o que garante maior estabilidade à arvore.

Solução análoga foi muito utilizada em pilares de edifícios, principalmente durante o movimento modernista.
A concepção em forma de K permitia a transição de pilares dos pavimentos superiores sem o uso de vigas, constituindo-se em solução mais econômica.
Com esses pilares, os pavimentos térreos dos edifícios ficavam mais livres, o que era um dos objetivos da arquitetura modernista.

O bambu

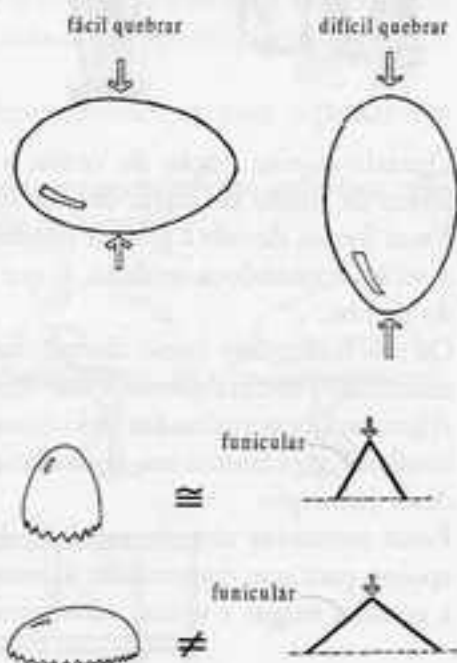
O bambu é uma planta de caule cilíndrico, longo e de consistência lignosa, podendo atingir, como algumas espécies de Java, a altura de 45 m.

O caule é oco, apresentando septos aproximadamente eqüidistantes denominados nós. Tem grande flexibilidade, o que lhe permite resistir a grandes rajadas de vento. Os nós garantem a manutenção da forma da seção transversal, o que propicia grande resistência.

Quando sujeito à ação do vento, o bambu sofre flexão, o que resulta em forças de tração em parte das fibras e de compressão em outras.
Essas forças, devido à grande flexibilidade do material, poderiam deformar a seção, tornando-a ovalada, o que diminuiria radicalmente a resistência do bambu.
Os nós funcionam como diafragmas que impedem a deformação da seção, mantendo integralmente a sua resistência.
Algumas obras realizadas pelo homem usam o mesmo princípio físico do bambu. Encontramos nas abóbadas e placas dobradas exemplos de aplicação desse princípio.
Essas estruturas têm necessidade de usar diafragmas, principalmente nos apoios, para que mantenham as suas seções indeformadas e possam resistir a grandes cargas e vencer vãos significativos.

Na figura, vê-se um outro tipo de aplicação dos diafragmas.
Neste caso - uma ponte pênsil de 3.000 m de vão, projetada por Nervi para o estreito de Messina - os pilares de sustentação dos cabos são feitos com uma fina casca de concreto enrijecida por diafragmas horizontais.

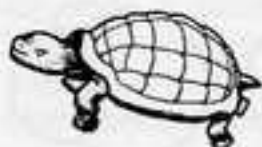
A casca do ovo

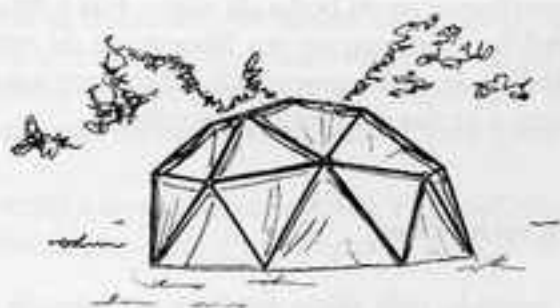
A casca do ovo é formada por cálcio , material com boa resistência à compressão e baixa resistência à tração. Quando está sujeita predominantemente a compressão simples, a sua resistência é muito grande. O mesmo já não acontece quando é flexionada (compressão e tração concomitantes) ou apenas tracionada; nesta situação, a sua resistência cai muito. Na formação do embrião, a parte correspondente à clara vai aos poucos secando; com isso, aumenta o efeito da pressão atmosférica sobre a casca; a forma curva do ovo adapta-se bem à distribuição externa de forças que decorre da pressão atmosférica, com predominância de compressão simples.

Outra experiência é apresentada na figura ao lado. Se for comprimido por uma força concentrada na direção do seu eixo maior, como mostra a figura, o ovo oferece uma resistência muito grande.
No entanto, se comprimido na direção do menor eixo, quebra-se com facilidade. Essa experiência ilustra bem o conceito de caminho de forças e de funicular de forças.

A seção transversal do ovo, mostrada na figura, apresenta dois tipos de arcos, um mais pontiagudo e outro mais abatido.

Se a aplicação da força ocorrer contra o arco mais pontiagudo, haverá menos flexão, predominando a compressão simples, já que essa forma se aproxima do funicular de uma única força, que é o triângulo (caminho natural ou funicular da força até a base); desta forma, com pouca flexão e predomínio de compressão simples, o material da casca resiste bem.
Se a força for aplicada contra o arco mais abatido, o funicular se afastará bem da forma do arco e ocorrerá grande flexão, comprometendo a resistência da casca.
Dessa experiência conclui-se que arcos que apresentam cargas concentradas no meio do vão devem ter a sua conformação alterada, aproximando-a da forma triangular, mais próxima do funicular da força isolada.

A tartaruga

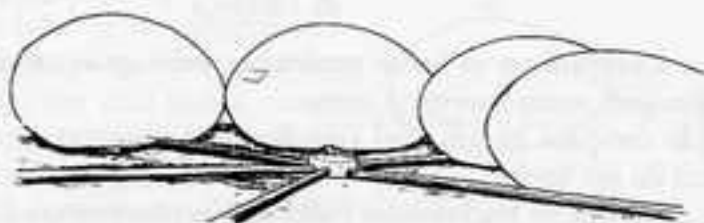
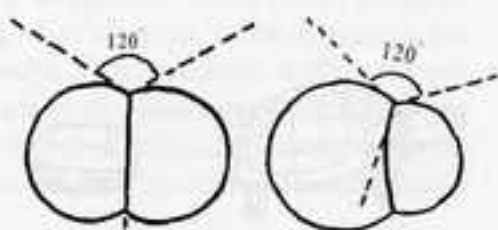
A carapaça que envolve o corpo da tartaruga, protegendo-a da pressão da água principalmente quando submersa, é uma estrutura muito interessante.

Além do formato de cúpula, favorável ao predomínio de forças de compressão simples quando submetida à pressão da água, a carapaça dispõe de algumas linhas definindo um desenho com o aspecto de gomos e formando dobraduras que aumentam a rigidez da carapaça.

Essas linhas acompanham as linhas geodésicas, pelas quais caminham os esforços principais numa superfície curva.
Em volta da carapaça há um anel cuja função é absorver os empuxos provenientes do seu apoio.
As cúpulas geodésicas de Buckminster Fuller, usadas na cobertura de grandes vãos, ou as cúpulas projetadas por Nervi são exemplos de modelos análogos ao que a natureza criou na carapaça da tartaruga.

As estruturas cujas barras acompanham as curvas geodésicas, como nos exemplos mencionados, são leves e econômicas.

A bolha de sabão

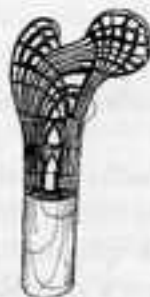
A bolha de sabão é criada como resultado das tensões superficiais que agem interna e externamente à película.

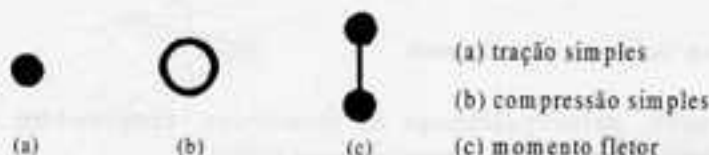
Como essas tensões são uniformes, destacam-se duas características muito importantes na bolha de sabão: a sua área superficial é mínima e as solicitações são iguais em todos os pontos, não havendo concentração de tensão. Assim, obtém-se uma estrutura mais econômica.

Outra observação interessante é que, sempre que duas bolhas de sabão se juntam, forma-se entre as suas superfícies um ângulo de 120 graus. Se as duas tiverem o mesmo tamanho, a superfície comum ou de contato será plana; caso contrário, apresentará uma curvatura.

As estruturas pneumáticas, ou seja, sustentadas por pressão de ar, têm comportamento semelhante ao da bolha de sabão. Frei Otto, pesquisando estruturas de superfícies mínimas, no seu laboratório de estruturas leves, estudou muito as bolhas de sabão, procurando estabelecer associações entre as suas características e as das estruturas pneumáticas.

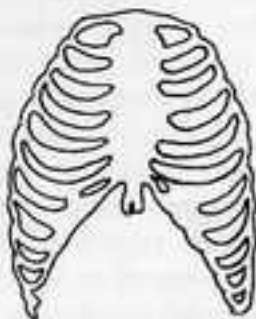
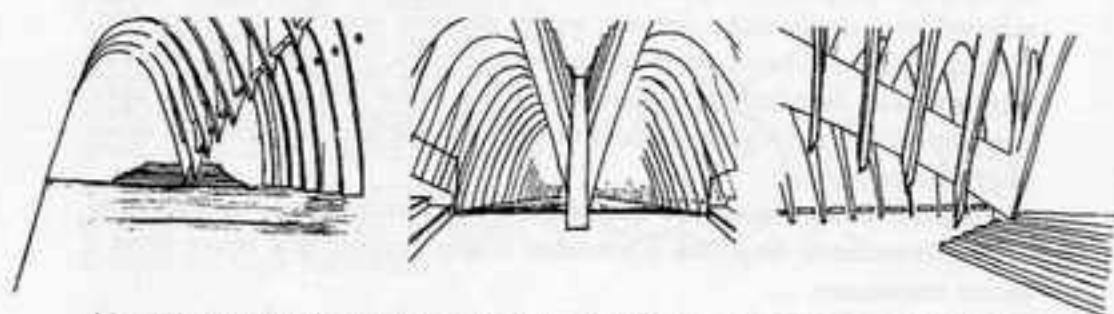
O osso dos vertebrados

O osso é formado pelo cálcio fixado a uma matriz que lhe dá a forma. Essa matriz pode ser deslocada, diminuída ou ampliada pela movimentação de material através do sangue que circula nas veias e artérias.

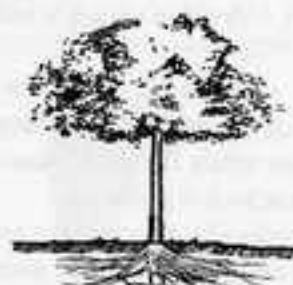
A densidade do osso, que pode ser avaliada por raios X, é variável, sendo maior nas regiões mais solicitadas pelas forças externas e menor nas menos solicitadas.

Com isso, um osso que deixa de ser solicitado, em determinada direção, perde massa, nessa direção. Essa massa migra para outra posição mais solicitada, a massa total permanecendo constante.
Desta forma, o osso passa a ter a sua forma interna adaptada às modalidades de esforços a que se expõe. Seções circulares são comuns nos ossos submetidos a compressão simples; seções elípticas ocorrem em ossos que, além de estarem submetidos a compressão simples, encontram-se também sob flexão. A descalcificação que ocorre nos ossos dos astronautas, após longos períodos em regime de falta de gravidade, é uma confirmação dessa migração de massa.
Outra característica notável é que os ossos são formados por paredes finas convenientemente dispostas e travadas, o que permite que sejam leves e muito resistentes.
O fenômeno de migração de massa nos ossos é ilustrativo do princípio de distribuição de massas nas seções das peças estruturais.
A escolha da forma da seção de um determinado elemento estrutural deverá ser coerente com o esforço a ela aplicado.

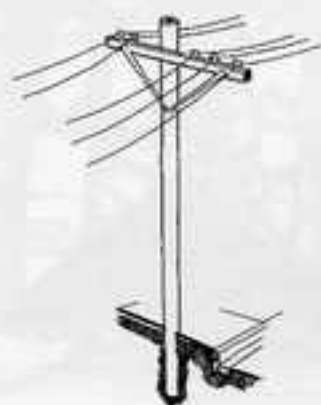
(a) tração simples
(b) compressão simples
(c) momento fletor

Assim, as forças de tração simples devem ser absorvidas por seções em que a massa se concentre nas proximidades do centro de gravidade.
Nas seções sujeitas a compressão simples, a massa deve ser uniformemente distribuída e afastada do centro de gravidade, para que a seção seja estável à flambagem.
Caso a seção venha a ser submetida a flexão, a massa deverá estar distribuída longe do centro de gravidade e na direção de atuação do momento fletor.

A caixa torácica humana

A caixa torácica é uma espécie de gaiola que protege vários órgãos vitais do ser humano, como o coração e o pulmão.
É composta de costelas em forma de arcos fixadas, numa das extremidades, na coluna vertebral e, na outra, em um osso resistente e rígido chamado esterno.

A ligação rígida entre os arcos das costelas e o esterno garantem a elas maior capacitação a esforços de flexão, além dos de compressão simples, para os quais a sua forma já é naturalmente favorável. Desta maneira, forças concentradas, como golpes exteriores contundentes, que causam grande flexão nos arcos das costelas, podem ser melhor absorvidas.

Algumas obras feitas pelo homem não só utilizam o mesmo princípio físico como também se apropriam esteticamente de suas formas.
Uma delas, apresentada na figura acima, é de autoria de Santiago Calatrava.

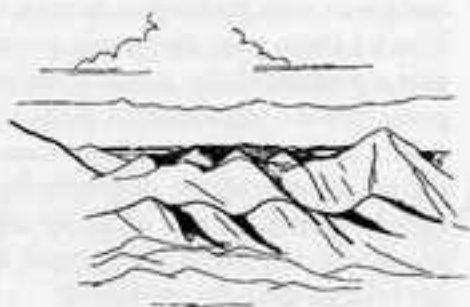
O sistema radicular das árvores

As árvores, principalmente as frondosas, apresentam um interessante desenvolvimento na forma de suas raízes.
Quando germina, a semente lança uma haste para cima, que se tornará o futuro tronco, e uma para baixo, que dará formação às raízes.
Enquanto a árvore tem pequena dimensão, a raiz se desenvolve como um pino, aprofundando-se na terra.
Esse tipo de raiz recebe o nome de raiz pivotante.
A raiz pivotante cresce com a árvore.
Quando, por seu peso e dimensões, a árvore não puder mais suportar os efeitos do vento, outras raízes - radiais e mais superficiais - começam a se desenvolver e a raiz pivotante pára de crescer.

germinação arbusto árvore

Esta solução ilustra bem a forma econômica e lógica com que a natureza resolve os seus problemas estruturais.
Não há razão para que a raiz pivotante continue crescendo com a árvore, pois a profundidades muito grandes não existe solo fértil, do qual a árvore possa retirar o seu alimento; além disso, a resistência do solo vai aumentando com a profundidade, exigindo maior esforço para a penetração da raiz, daí ser mais interessante o desenvolvimento das raízes menos profundas e radiais. Normalmente, o círculo abrangido pelas raízes superficiais é igual ao círculo da copa, o que garante a estabilidade da árvore, principalmente em relação às forças do vento.
No interior, quando se deseja saber a direção dos ventos predominantes, basta descobrir as raízes de uma árvore e verificar em que direção elas são mais densas.
Esta é uma prova do comportamento das raízes como elemento de fundação das árvores, além, claro, das suas funções de nutrição.
Existem analogias entre o sistema de raízes das árvores e as soluções adotadas em fundações de edificações feitas pelo ser humano.

A fundação de um simples poste de concreto ou de madeira, para fios elétricos, consiste em apenas enterrar uma parte do seu corpo, pois os esforços, principalmente de vento, são pequenos, dada a sua reduzida superfície de obstrução.

Já uma caixa d'água elevada, de grandes dimensões, necessita de uma fundação muito mais sofisticada. Ninguém pensaria em afundar parte do corpo da caixa d'água, para fazer a sua fundação, o que seria por demais antieconômico. A figura ao lado mostra uma possível solução de fundação para uma caixa d'água elevada, muito semelhante ao desenvolvimento das raízes superficiais das árvores.

Dunas e montanhas

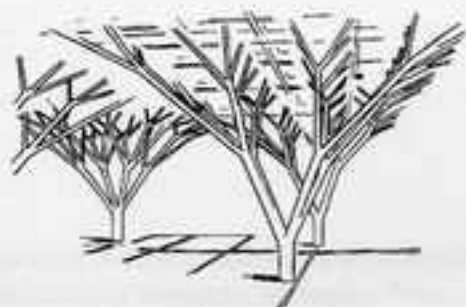
As dunas e montanhas são exemplos de como a natureza busca resolver seus problemas de estabilidade de maneira econômica. As protuberâncias formadas pelas areias e pelas montanhas apresentam uma geometria próxima à da pirâmide.

A forma piramidal é a mais favorável para o empilhamento de elementos estruturais, principalmente quando eles atingem grandes alturas.
Isso se deve a duas principais razões: com o aumento do peso, há a necessidade de se aumentar a base de apoio, de modo que as tensões sejam sempre da mesma ordem de grandeza, em qualquer seção horizontal; as formas triangulares das faces garantem grande rigidez a forças horizontais, pois o triângulo é uma figura rígida.
A principal analogia para o comportamento das dunas e das montanhas encontra-se nas pirâmides.

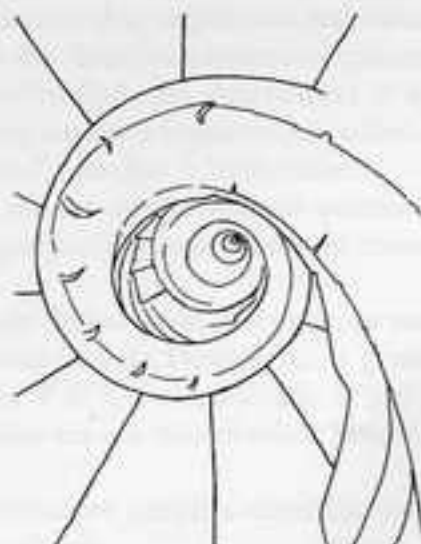
As dunas, com certeza, serviram de inspiração para a construção de pirâmides, em locais tão distantes como a África e a América.

As altas torres não estaiadas, como por exemplo a torre Eiffel e as de linhas de transmissão, seguem essa analogia, apresentando variação na sua largura, desde a base até o topo.

Conclusões

O que se pretendeu evidenciar, nesta parte do trabalho, é que o homem pode, observando o comportamento da natureza, ter mais uma fonte de inspiração para a sua criatividade.
Não se defende aqui a simples imitação, projetando ao léu casas em forma de flores ou de casulos, mas a percepção dos princípios físicos que regem o comportamento dos sistemas estruturais naturais e que podem inspirar ou até ensinar novas possibilidades.
A cópia direta das formas naturais nas edificações não é um fato raro.
A história da arquitetura está repleta de exemplos de soluções arquitetônicas em que as formas foram diretamente copiadas da natureza.
Entre tantos outros, o teto de vidro, projetado por Paxton para o Palácio de Cristal, que imita a forma de uma vitória-régia, ou Gaudi imitando, em suas escadas, a forma e a textura de um caracol, como mostram as figuras.

teia de aranha

árvores

cogumelos

caracol

CAPÍTULO 7

Um Pouco da História do Conhecimento Estrutural, sua Divulgação e Aprendizado

Introdução

Um famoso historiador foi certa feita indagado sobre o que entendia por História. A resposta foi dada mediante o seguinte exemplo: "numa esquina movimentada de uma cidade qualquer, dois veículos batem provocando sérios estragos materiais; testemunhas são convocadas, para identificação do real culpado que ressarcisse dos prejuizos a real vítima. Cada testemunha apresenta uma versão dos fatos completamente diferente das demais, o que implica a impossibilidade de determinar o que efetivamente ocorreu, ficando para o bom senso e a lógica do juiz a decisão da contenda". "Para mim, isto é História", concluiu o historiador.

A História é relatada – oralmente, ou através de documentos escritos ou de expressões artísticas - por pessoas que participaram, viram ou tiveram notícia dos acontecimentos.

Deste modo, é impossível a total isenção do narrador, que pode, às vezes inconscientemente, transformá-la em estória.Heródoto, o grande historiador grego que viveu no século V a. C., considerado o "pai da História", descreveu com grande precisão fatos e testemunhos históricos que o precederam.

Muitos dos seus relatos foram comprovados por pesquisa científica, outros ainda estão tendo a sua veracidade investigada.

Portanto, as informações que vêm a seguir devem ser tomadas com cautela quanto à sua legitimidade histórica, sendo muito mais importante aproveitá-las como uma fonte de pesquisa e de referência.

Falar sobre a história da arquitetura e da engenharia dos tempos pré-históricos ou mesmo de épocas mais recentes é muito difícil, já que documentos específicos são muito raros, restando apenas os testemunhos dos objetos deixados, como pirâmides, templos, castelos e monumentos. "Hoje conhecemos bem os hieróglifos, a gramática e também alguns textos literários egípcios, mas desconhecemos quase tudo da arte da construção entre os faraós. Esta conjuntura técnica não é a única na história das civilizações desaparecidas, já que ainda não desvendamos todos os segredos da edificação das catedrais, muito mais próximas de nós no tempo." (René Poirier).

Outro agravante é que a pesquisa da história ortodoxa da engenharia e da arquitetura tem-se preocupado mais com o "registro de edifícios de certa grandiloqüência, vinculados entre sí por laços familiares, mas afastados da vasta arquitetura anônima...que só dá uma imagem muito incompleta do homem com construtor" (Rudofsky).

Talvez outras fontes de pesquisas, como a arquitetura vernacular, pudessem ser mais ricas em informações, mas um certo preconceito tem afastado os pesquisadores dessas fontes. "A arquitetura vernacular não inspira respeito, talvez porque vem em pequenas doses, com casas e cabanas. Sem dúvida, só por causa da sua enorme variedade, comparável à das formas biológicas, deveria provocar interesse" (Rudofsky).

Outra dificuldade a superar, quando se estuda a evolução do conhecimento sobre a arquitetura, é que, sendo arte, ela é passível de interpretação subjetiva, como as demais artes visuais.

"Na base de todos os nossos mal-entendidos sobre as artes visuais, e a arquitetura em particular, está a suposição de que duas ou mais pessoas que olham o mesmo objeto vêem a mesma coisa. É certo que não" (Rudofsky).

A questão envolvendo o relato de fatos atinentes à construção, seja de abrigos ou de templos, é tão antiga quanto o Velho Testamento.

Nas suas páginas, fica claro que, após ter perdido o paraíso, o homem foi obrigado a criar o seu próprio abrigo para poder sobreviver por sua conta e risco; é quando, "na segunda geração, apareceu Caím, urbanista e assassino" (Rudofsky).

A própria Bíblia, que pretende, mesmo de maneira parabólica, ser o "testemunho da verdade", torna-se desinteressada e omissa quando fala de construção: aborda a edificação de uma cidade inteira – Henoque - sem explicar quem nela trabalhou, ao tempo em que toda a população da Terra se resumia a uma família !

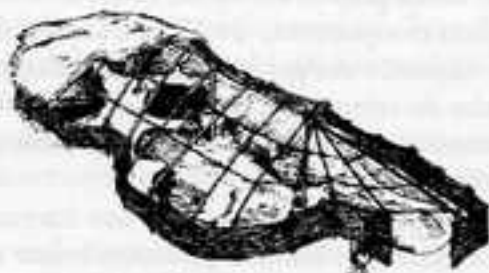
Por outro lado, há sempre a tendência de exaltar os grandes feitos alcançados pela humanidade, deixando de comentar os erros, que poderiam ser uma fonte preciosa de informações e de aprendizado.
O historiador "deveria habituar-se a ver a arquitetura não como uma enumeração histórica, mas como um inventário das sutilezas e dos erros humanos" (Rudofsky).

A natureza ensina

"Nós formamos nossos edifícios e logo eles nos formam" (Winston Churchill).
A primeira atividade humana de sobrevivência foi a alimentação.
Mas nem sempre o alimento encontrava-se à disposição no seu entorno. Era preciso caminhar e procurá-lo.
Ao longo da caminhada, muitos obstáculos, como rios e vales, eram encontrados. A natureza, algumas vezes, facilitava a vida do caminhante, oferecendo passagens naturais feitas de cipós ou de pedras que se compunham acidentalmente em estruturas. Eram as primeiras pontes, as pontes naturais. Apesar de raras, algumas dessas impressionantes pontes naturais ainda podem ser vistas, como a Rockbridge County, na Virgínia, EUA, com comprimento de 27 m e largura de 42 m.
Nessas viagens, o abrigo, quando necessário, era muito precário e executado com peles de animais ou fibras vegetais.
As cavernas eram, antes de tudo, santuários que só depois passaram a ser habitadas.
Ao tentar atravessar um riacho e não havendo qualquer possibilidade de travessia natural, o homem procurou imitar a natureza, lançando mão de um tronco caído, ou empilhando pedras ou, ainda, usando tranças de cipó.
O homem criou a sua própria obra e sentiu-se poderoso e envaidecido por ter superado um obstáculo natural. A façanha foi contada aos parentes, amigos e vizinhos, que aprenderam os procedimentos empregados, transformando-os em regras que passaram a seguir.
O tipo de ponte executado dependia dos materiais disponíveis. Nas regiões de florestas, eram executadas pontes de vigas, já que os troncos de árvores eram abundantes; nas regiões rochosas, as pontes eram feitas com lajes de pedra apoiadas sobre "pilares" construídos com pedras empilhadas ou com uma só peça colocada na vertical. Nessa época, já haviam sido desenvolvidas algumas ferramentas que auxiliavam na execução das obras.
Depois desse grande salto criativo, o desenvolvimento na construção de pontes tornou-se mais vagaroso.

Esse audacioso feito - vencer um vão imitando a natureza - pode parecer hoje muito corriqueiro, mas, à época, tal associação só podia ser estabelecida por um cérebro muito desenvolvido. De fato, alguns estudos mostram que o QI do homem neolítico deveria ser maior do que o do homem atual (na verdade, o seu volume cerebral era mesmo maior).
O que privilegiava o homem dessa época era a sua constante atenção aos fenômenos naturais, embora freqüentemente não conseguisse explicá-los.

Começa a história

Por volta do ano 5.000 a. C., o homem aprendeu a domesticar animais e a cultivar alguns grãos como o arroz, a cevada e o trigo.
Era a invenção da agricultura, que provocou grande revolução social.
Não tendo mais necessidade de procurar o alimento em locais afastados, o homem tornou-se sedentário e portanto passou a precisar de abrigos permanentes. O estudo da arquitetura vernacular evidencia que o homem nem sempre se abrigou em cavernas naturais, mas muitas vezes escavou sua moradia nas rochas ou mesmo no próprio chão, como mostram alguns exemplares em Lindenthal.

Rudofsky, Bernard - "Constructores Prodigiosos - Apuntes sobre Una Historia Natural de la Arquitectura" -Editorial Concepto, México, 1984. - Pag. 107.

Antes mesmo de se preocupar com sua moradia, o homem já havia erguido muitos monumentos. Era comum a reunião de muitos braços para "levantar seqüências de monólitos fascinantes e inúteis" (Rudofsky).
Erguiam pedras formando grandes círculos ou extensas e monótonas filas.

Rudofsky, Bernard - "Constructores Prodigiosos - Apuntes sobre Una Historia Natural de la Arquitectura" -Editorial Concepto, México, 1984. - Pag. 111.

"Parece que empilhar pedras era um impulso irreprimível. Homens e macacos colocavam pedras porque gostavam de olhá-las ? Buscavam com consciência esse abraço abstrato ? Ou o ato de construir círculos seria em si placentário ? Até que ponto influía a antecipação ou a recordação nos sentimentos do construtor ? *O homem pré-histórico não deixou registros* que permitam responder a essas perguntas, nem o chimpanzé poderá ajudar-nos". (Rudofsky). "A humilde casa é posterior aos monumentos". (Rudofsky).

Rudofsky, Bernard - "Constructores Prodigiosos - Apuntes sobre Una História Natural de la Arquitectura" - Editorial Concepto, México, 1984. - Pag. 26.

As pinturas rupestres das cavernas representam algumas figuras que muito semelhantes a elementos construtivos.

Gravações na caverna de Dordogne, na França, reproduzem pilares e vigas de madeira. Essas formas mostram que os artistas tinham conhecimento rudimentar de geometria, já que desenhavam retângulos e quadrados.

Como o artista primitivo não estava muito interessado em representar natureza morta, como mostra a maioria das pinturas de cavernas, pode-se supor que as pinturas que exibiam formas construtivas seriam o meio para divulgar conhecimentos técnicos adquiridos.

Como no caso das pontes, o material disponível próximo ao local determinava o sistema estrutural das habitações.

O livro ritual chinês fala de reis pré-históricos que moravam em cavernas durante o inverno e em ninhos, como pássaros, durante o verão.

Rudofsky, Bernard - "Constructores Prodigiosos - Apuntes sobre Una História Natural de la Arquitectura" Editorial Concepto, México, 1984. - Pag. 58.

A transmissão dos conhecimentos adquiridos na arte da construção, assim como dos gostos arquitetônicos, foi possível graças à intensa comunicação mantida pelos viajantes pré-históricos.

O caráter menos individualista do homem pré-histórico, necessário para a sua sobrevivência, permitia que ele se predispusesse a transmitir de imediato o que acabara de aprender.
Essa atitude facilitava a divulgação do conhecimento de maneira mais rápida, atingindo lugares bem distantes da origem do aprendizado.
Com a invenção da agricultura, o homem tornou-se sedentário e provocou o aparecimento de muitos assentamentos permanentes; destes destacavam-se os dos sumérios e acádios, que se estabeleceram nas margens dos rios Tigres e Eufrates, e os dos egípcios, nas margens do Rio Nilo.
Os sumérios e acádios fundiram-se posteriormente num só povo: os caldeus.
Os sumérios tinham uma civilização muito adiantada, que chegou a se antecipar à dos egípcios.
Construíam com tijolo seco ao sol.
A invenção do tijolo deve ter-se originado da cerâmica utilizada na fabricação de utensílios; os tijolos queimados eram muito raros, devido à dificuldade de obtenção de combustível, e a pedra era importada da Pérsia.
Inicialmente, aprenderam a vencer vãos utilizando um tipo de estrutura cuja forma é semelhante a um arco, por isso denominada arco falso.
O arco falso não apresenta aduelas que se juntam face contra face, como no arco verdadeiro.
É composto de aduelas que se projetam em pequenos balanços, umas em relação às outras, o que não lhe confere capacidade de vencer grandes vãos.
Por volta de 4.000 a. C. é que vieram a conhecer o arco verdadeiro; provavelmente inventado ao acaso, a partir de um engano na execução de um arco falso.
O arco verdadeiro também tornou-se conhecido dos egípcios, só que alguns séculos mais tarde.
Os arcos eram usados como elementos de sustentação de aberturas em paredes.
Os povos que habitavam o Egito uniram-se, por volta do ano 3.200 a. C., sob o reinado do Faraó Menés.
A partir daí se sucederam 26 famílias ou dinastias.
Foi durante a terceira dinastia (2980 - 2474 a. C.) que o Egito teve um grande desenvolvimento na atividade de construção, até então voltada às pequenas obras.
O crescimento das religiões organizadas ajudaram a implementar a atividade, influenciando o tipo de construção.
Teve início a época das construções monumentais: grandes tumbas foram erigidas e o arquiteto Imhotep inventou a pirâmide de degraus, precursora das grandes pirâmides de Gizé. Nelas foram usados grandes blocos de pedras, trazidos do Alto Nilo, que atingiam até 500 tf.

Apesar de grandes construtores, os egípcios não foram inovadores nas técnicas construtivas. Suas primeiras construções de pedra apenas reproduziam o que era feito com madeira, barro e tijolo.
Apesar de terem aprendido com os sumérios a construir os arcos verdadeiros (algumas abóbadas em arco foram encontradas em Dindereh), não utilizavam com freqüência este sistema estrutural, preferindo o sistema viga x pilar ou o empilhamento de blocos de pedra, como nas pirâmides.
Uma das razões para a reduzida utilização do arco era que os egípcios não necessitavam vencer grandes vãos, pois não tinham muita demanda por pontes; o seu percurso natural era a "grande estrada" formada pelo Rio Nilo.
Os monumentos, cujo processo construtivo se baseava exclusivamente no empilhamento de grandes blocos de pedra, como as pirâmides, não tiveram paralelo, à época da civilização egípcia.
Uma das explicações para o uso desse sistema construtivo é a hipótese de que o grande esforço humano utilizado nas obras "serviram para descarregar a energia que raças menos desenvolvidas dedicavam à guerra; pelos resultados, é impossível saber se os homens trabalhavam voluntária e alegremente ou sob chicote". (Rudofsky).
Os egípcios até então não conheciam o ferro e a roda, que lhes foram apresentados pelos israelitas, por volta do ano 2.000 a. C. .
Este é um forte indício de que havia uma intensa troca de conhecimentos entre os povos pré-históricos, apesar da aparente dificuldade de comunicação.
Embora seja possível conhecer a cultura egípcia pelas gravuras encontradas, pouca coisa pôde ser apreendida no que se refere à construção.
As gravuras mostram a fabricação e o transporte dos tijolos, mas ainda são desconhecidas gravuras que façam referência a métodos construtivos.
Assim, até hoje não se conhece exatamente o processo de construção utilizado pelos egípcios, principalmente nas pirâmides.
O próprio Heródoto, sem qualquer certeza, especulou sobre duas diferentes possibilidades, mostrando-se incoerente numa delas, o que é justificável. Arqueólogos, como Lauer, atribuem o possível mal-entendido ao fato de que Heródoto não tinha conhecimento técnico do assunto.
Parece que os egípcios não davam muita importância ao desenho do projeto, mas sim a quem projetava, tanto que o nome do inventor das pirâmides é conhecido, mas o seu projeto não.
Os desenhos dos projetos na verdade existiam, o que pode ser comprovado, pelo menos no caso dos sumérios, por uma estátua que se encontra no museu do Louvre, mostrando o rei Gudéia, que reconstruiu a cidade de Lagash, na Suméria, por volta de 2200 a.C.

A estátua mostra o rei sentado, tendo no colo material de desenho e uma planta de construção.

Kirby, Richard Shelton e outros - "Engineering in History" - Mac Graw Hill, New York, 1956. - Pag. 11.

Fora este testemunho, nenhum outro documento, escrito ou desenhado, foi encontrado. Consta que, por questão de economia, as costas dos papiros e pergaminhos contendo os projetos eram aproveitadas para outros registros com fins diversos, o que inviabilizava o seu arquivamento.

A inexistência de projetos atestando obras ainda desconhecidas faz com que persistam informações duvidosas, como a de Deodoro da Sicília, que viveu por volta de 58 a. C., dando conta da existência de um túnel em abóbada, feito de tijolo, sob o Rio Eufrates. Tal afirmação não foi até hoje confirmada, mais parecendo uma fantasia cultivada pelos habitantes da região.

Cerca de 2.500 a. C., algumas comunidades fora das áreas habitadas pelos sumérios e egípcios desenvolveram intensamente a construção de madeira. Uma delas, denominada "habitantes dos lagos", na região da Suíça, morava em pequenas casas de madeira de estrutura do tipo viga x pilar.

Essas casas eram construídas em cima de plataformas de madeira sobre o lago. Para suportar as plataformas, desenvolveram um processo de cravação de estacas de madeira no berço do lago, imitando o processo usado para pontes sobre rios.

Para as suas coberturas de duas águas, conceberam um tipo simples de treliça, composta de apenas duas barras inclinadas, travadas uma contra a outra, e apoiadas sobre dois pilares, também de madeira.

Esses homens foram provavelmente os primeiros a cravar estacas de madeira para fundação, bem como os primeiros a usar o sistema de teliças.

Mais tarde, os persas, povo guerreiro e conquistador, no afã de alcançar outros territórios, tiveram necessidade de desenvolver a arte de construir pontes.

Elas eram rapidamente erguidas e, após a ultrapassagem, imediatamente demolidas, para não servirem também aos inimigos.

Por isso, não restaram vestígios delas, a não ser pelos relatos de Heródoto.

Os persas também desenvolveram construções em arcos e, por volta de 350 a.C., construíram uma ponte sobre o rio Diz, em Dizful, na província de Khuzistan, com vinte arcos verdadeiros e pontiagudos feitos de tijolos. Esses arcos ogivais podem ter sido uma das fontes de inspiração da arquitetura gótica.

Um povo que mostrou grande audácia estrutural foram os chineses; suas estruturas eram sempre explicitadas, jamais escondidas por qualquer tipo de ornamentação.

As pontes eram construídas com arcos de pedra.

Os chineses aprenderam a construir arcos, diretamente da fonte, com os seus inventores, os sumérios.

A religião budista, proveniente da Índia, pode também ter ajudado a difundir o uso do arco, já que esse sistema era conhecido naquele país.

O trabalho de construção de pontes adquiriu caráter religioso, já que a construção de uma ponte era um dos "bons trabalhos" que o recém-convertido podia realizar.

As pontes, por excesso de economia, apresentavam dimensões extremamente esbeltas, comportando-se no limite de resistência.

As primeiras pontes de pedra, no norte da China e no delta do Rio Yangtze, imitavam as estruturas de madeira.

A ponte tinha um simbolismo especial para os chineses, correspondente ao das praças para os povos ocidentais.

Nas pontes, havia uma série de atividades, como reuniões e comércio.

A arte e a ciência da construção de pontes foi ciosamente guardada pelos construtores chineses: os conhecimentos eram transmitidos apenas de pai para filho e alterações nos processos construtivos eram evitadas, porque acreditavam que os espíritos maus podiam não aprovar.

Os construtores se contentavam apenas em criar as estruturas, nunca se importando de divulgar seus nomes.

Por isto, não se se tem o registro do nome de nenhum construtor.

Para facilitar a sua execução, os projetos das pontes eram desenhados em escala ampliada numa parede branca, nas proximidades do local de construção.

Desta forma, não subsistiram quaisquer documentos com as características específicas desses projetos.

Aproximadamente no ano de 1.400 a. C., os fenícios, povo especialmente dedicado ao comércio e que contribuiu sobremaneira para a disseminação da cultura dos povos mais adiantados aos mais atrasados, criaram o alfabeto, a partir de vinte e dois sinais extraídos da escrita egípcia.

A escrita, inicialmente usada apenas para fins comerciais, facilitou bastante o registro do conhecimento da época.

O sistema estrutural viga x pilar dos gregos

Não se conhece com exatidão a história remota do povo grego.
O que se sabe está envolto em lendas e mitos.
A civilização conhecida pode remontar a 1.500 a. C., quando os aqueus venceram os cretenses, moradores da região, e fundaram diversas cidades, sendo Micenas a principal.
Outros grupos vieram depois: os eólios, os jônios e os dórios.
Como grande parte do seu território era constituída por ilhas e os gregos destacavam-se como exímios navegadores, a comunicação por via terrestre entre as províncias não era habitual e tampouco se desenvolveu a construção de pontes.
No transporte terrrestre, havia necessidade de atravessar apenas rios estreitos, para o que as pontes de vigas eram suficientes.
Apesar de conhecerem a construção de arcos desde do século V a. C., os gregos não venceram grandes vãos usando esse sistema.
Algumas pontes de arcos que permaneceram – como a ponte de Pergamon, com um pequeno vão de 8 m - provam que eles dominavam o seu processo de construção.
Em razão dessas condições, tornaram-se os maiores expoentes na construção do sistema viga x pilar.
"Em Assos, na Lídia, os antigos gregos construíram uma ponte típica feita de dezessete pilares de pedras na forma de diamante que eram separados de 3 m entre centros. Todas as pedras eram cuidadosamente cortadas e aparelhadas.
O piso consistia de lajes de pedra de 50 cm de espessura e 60 cm de largura, colocadas longitudinalmente de pilar a pilar.
As lajes verticais eram cuidadosamente unidas por tarugos de ferro, uma técnica que os navegadores gregos provavelmente aprenderam dos egípcios". (Steinman).
Os gregos, em princípio, não usavam métodos científicos de investigação, pois tinham grande resistência à experimentação empírica, mas estavam constantemente procurando encontrar respostas, mesmo que filosóficas, para milhares de questões a respeito do comportamento da natureza. Esse interesse colaborou para criar a preocupação em sistematizar o conhecimento.
Por isso, por volta do ano 600 a. C., Thales, astrônomo e geômetra, fundou a primeira escola de ciências, na cidade de Tenedos.
Desta forma, iniciava-se um processo de formação científica mais sistemática, o que beneficiou não só o progresso das ciências naturais, como o da própria arte da construção.

O período áureo da civilização grega, denominado "o século de Péricles", ocorreu em torno de 400 a.C, durante o governo de Péricles, época em que pontificaram Sócrates, Platão, Aristóteles, Heródoto e outros.
Aristóteles iniciou estudos sobre o princípio da alavanca, chegando a concluir que "o peso que é movido está para o peso que move na razão inversa dos comprimentos dos braços de alavanca".
Apesar de os gregos estarem mais interessados em desvendar os segredos da astronomia, alguns conceitos importantes para a construção foram legados por sábios como Arquimedes (287 - 212 a.C.), que estudou o princípio da alavanca e do centro de gravidade dos corpos.
A não ser pelos monumentos, pouco ficou de documentação escrita a respeito da atividade construtora dos gregos.
Os arquitetos e mestres pedreiros possuíam grande conhecimento empírico, que era guardado em segredo. Felizmente, mais tarde, já no império romano, surgirá Marcus Vitruvius Polio que descreverá com precisão os princípios contidos nos sistemas construtivos dos gregos.

O impulso construtor dos romanos

Os etruscos eram o povo que habitava a parte central da península alongada onde hoje se localiza a Itália.
A sua origem é desconhecida, mas provavelmente eram oriundos da Ásia Menor e constituíam uma civilização bastante adiantada quando Roma ainda era uma cidade bem pequena.
Os etruscos sabiam trabalhar bem com metais como o bronze, o ferro, o ouro e a prata. Também eram muito desenvolvidos nas áreas da arquitetura e da engenharia, pois construíam com perfeição estradas, túneis e pontes assim como dominavam o processo construtivo dos arcos e abóbadas.
Não se sabe se esse conhecimento lhes foi transmitido ou adquirido por conta própria.
De qualquer forma, nessa fonte os romanos foram buscar o conhecimento da técnica de construção de arcos, que dominaram e desenvolveram amplamente, executando obras até hoje admiradas.
Por mais que os romanos pretendessem basear suas construções nos princípios gregos, essa influência não chegou a ser plena.
Vários fatores contribuíram para que eles, mais pragmáticos que os gregos, logo criassem uma arquitetura própria: a grande velocidade de crescimento do império, com a anexação de territórios cada vez mais distantes da capital, obrigou-os à criação de normas de padronização tanto de mão-de-obra como de materiais, para que o controle pudesse ser mais eficiente.

Isto forçou-os a praticamente reinventar sistemas construtivos, a criar uma nova arquitetura e a desenvolver novos materiais.
A descoberta da pozolana, por exemplo, possibilitou a execução de um tipo de concreto muito parecido com o atual, propiciando novas alternativas estruturais. O gosto pelo monumental, que exigia grandes espaços livres, resultou no uso intensivo de arcos, cúpulas e abóbadas, que permitiam vencer grandes vãos com espessuras relativamente reduzidas.
Jan Gympel, em seu livro The Story of Architecture, comparando os sistemas estruturais viga x pilar dos gregos e os arcos dos romanos, diz o seguinte: "O fato do arco ter-se tornado o elemento formal da arquitetura romana é sintomático. Enquanto as colunatas usadas pelos gregos transmitem uma sensação de tranqüilidade e êxtase, as filas de arcos (arcadas) sugerem força e dinamismo. Os arcos lançam-se para cima e retornam ao solo para, outra vez, dar início a um novo arco, assim propagando-se por longas distâncias. Converteram-se em um símbolo da compulsão expansionista que caracterizou o Império Romano".
Durante essa grande produção de edificações, surgiu o notável arquiteto Marcus Vitruvius Polio, que viveu no século 1 a. C. e, em homenagem ao imperador Augusto, escreveu o livro "De Architectura".
Neste livro, o autor descreve os métodos construtivos dos gregos assim como os do seu tempo. Sem o livro de Vitruvius seria difícil e até impossível compreender outros autores da época que usavam termos técnicos correntes em Roma. Suas anotações são precisas ao ponto de informar os leitores de detalhes sobre o comportamento de vigas e de apoios; no capítulo 11 do seu sexto livro, escreve: "quando são carregadas, as vigas se deformam no meio e podem causar ruptura; apropriadamente encunhadas, isto pode ser evitado pela colocação de duas peças de madeira inclinadas.
O peso da parede pode ser descarregado por arcos formados com blocos arranjados de forma concêntrica; estes, colocados sobre as vigas, aliviam-nas do peso e evitam a sua deformação.
Em todas as construções em que apoios e arcos são usados, os apoios externos devem ser mais largos do que os outros, para que possam resistir ao empuxo do arcos".
Os escritos de Vitruvius permaneceram quase desconhecidos por muitos anos, tornando-se mais tarde, já no Renascimento, a obra de referência máxima para a arquitetura e a engenharia.
Jamais, a não ser nos nossos dias, construiu-se tanto como o fizeram os romanos. "Eles não construíram por necessidade, nem almejando o ideal ou um conceito estético, tampouco pelo desejo de posses materiais, mas pelo mero prazer de construir, pelo inato deleite na realização da engenharia". (Steinman).

A idade da reflexão

Com a queda do Império Romano, muitos registros desapareceram, mas alguns conhecimentos sobreviveram, o que permitiu que os construtores medievais pudessem recomeçar.
Criou-se um corpo organizado de construtores itinerantes composto de pedreiros, carpinteiros e serralheiros que disseminou antigos e novos conhecimentos, provocando um novo surto de atividades na área da construção de grandes estruturas que resultou nos suntuosos edifícios eclesiásticos da Idade Média.
É comum dizer-se que na Idade Média houve pouca atividade científica, o que não é plenamente correto.
É verdade que quase nenhuma grande descoberta ocorreu naquela época. Entretanto, houve muita preocupação em recolher e reunir todo o conhecimento obtido pela humanidade até então; foi a época do florescimento do enciclopedismo, iniciada com Plínio, que viveu no primeiro século, ainda durante o Império Romano.
O próprio Leonardo da Vinci usou como fonte de suas pesquisas escritos do ano 970 sobre estática, deixados por Chirâz, sob o título "The Book of Euclid on the Balance", e do matemático Jordanus Nemorarius, do século XIII.
Por outro lado, com a desagregação do Império Romano, a Igreja teve a possibilidade de ampliar a sua influência por toda a Europa. Desta forma, tornou-se a mais importante promotora da cultura.
O ensino fundamental era dado em colégios anexos aos conventos; para os cursos superiores foram fundadas diversas universidades. Em 1119, surgiu a primeira universidade européia, a de Bolonha, a seguir a de Paris, em 1150, a de Oxford, em 1163, a de Salamanca, em 1218, e a de Cambridge, em 1229.
Roger Bacon, pertencente à ordem dos franciscanos, foi um dos poucos cientistas, nessa época, a se insurgir contra o ensino escolástico ministrado pela Igreja, baseado exclusivamente nos ensinamentos dos antigos sábios. Bacon chegou a incitar à queima de todos os livros de Aristóteles.
Devido às suas idéias, foi preso e totalmente ignorado por seus contemporâneos.
Os livros que escreveu só foram impressos 500 anos após a sua morte. Suas idéias influenciaram Galileu, Copérnico e outros. Considera-se que com Roger Bacon ocorreu a ruptura entre a Igreja e a ciência.
Os construtores da Idade Média não ficaram parados. Ao contrário, mantiveram-se em atividade e mostraram o caminho para os artistas construtores da Renascença.

A combinação de um projeto construtivo com as artes decorativas, sob o comando de um único profissional, sobreviveu da Idade Antiga e influenciou artistas construtores famosos, como Michelangelo Buonarotti e outros.
A construção de grandes catedrais floresceu nessa época, incentivada tanto pela Igreja como pelos imperadores que a ela se opunham.
Como toda a cultura era baseada nos tempos antigos, a arquitetura procurava imitar o estilo das igrejas romanas, daí designá-la arquitetura de estilo românico. Na construção de catedrais, muito do conhecimento adquirido pelos romanos havia-se perdido.
Como conseqüência, as catedrais românicas apresentavam uma estrutura de dimensões exageradas, com paredes muito espessas e dotadas de pequenas aberturas que propiciavam iluminação insuficiente.
A pólvora, apesar de conhecida pelos chineses desde os tempos antigos, só foi difundida na Idade Média e teve importante influência na arte das construções.
Com o notável aumento do poderio bélico proporcionado pela pólvora, as antigas estruturas tornaram-se frágeis, determinando o surgimento de um novo tipo de profissional habilitado para criar estruturas capazes de resistir à força dos canhões.
Nascia então o engenheiro militar, precursor do engenheiro civil, formado para projetar as fortificações, enquanto o arquiteto tradicional continuava a dedicar-se à construção de templos e de palácios. Pode-se dizer que essa foi a primeira ocasião em que ocorreu um afastamento entre a arquitetura e a engenharia.
O declínio do Império Romano, com o enfraquecimento do poder central, criou condições para o desenvolvimento de diferentes correntes arquitetônicas.
A perda do conhecimento armazenado pelos romanos na construção de cúpulas fez com que permanecesse a preocupação com a sua estabilidade, o que exigia toda uma nova experimentação empírica..
Como o cálculo estrutural para a determinação teórica dos esforços nas cúpulas ainda não tinha sido desenvolvido, o método utilizado foi o de tentativa e erro, o que freqüentemente redundava em colapso dessas estruturas.
A escola normanda foi a que teve mais sucesso em experimentos arquitetônicos e estruturais de articulação e divisão das paredes.
Por questões técnicas e estéticas, esses experimentos levaram inevitavelmente ao surgimento de abóbadas cruzadas, porque uma abóbada formada somente por arcos transversais poderia resultar em esforços inadequados nos arcos longitudinais que formavam as arcadas, assim como apresentar, nessas junções, problemas de ordem estética.

Por volta do ano de 1.100, nervuras foram colocadas sob as arestas das abóbadas, anunciando o desenvolvimento de um estilo que mais tarde o artista italiano Rafael denominaria pejorativamente de gótico, isto é, bárbaro, pois para os italianos todos os bárbaros eram godos.
A Catedral de Durham, construída entre 1091 e 1130, pode ser considerada a primeira catedral datada a ter a abóbada nervurada; nela, as abóbadas do lado da nave lateral foram substituídas por arcos botantes, mais leves e transparentes, que serviram para travamento das abóbadas da nave central. Essa solução começava a mostrar a viabilidade de estruturas mais leves.
A Catedral de Durham pode ser ao mesmo tempo considerada como o último exemplo do estilo românico e o primeiro do gótico.
Mais tarde, a escola de Île de France transformou a solução gótica em um estilo que logo se espalhou por todo o mundo ocidental.
Do ponto de vista estrutural, o gótico representava a passagem das estruturas pesadas, cuja resistência era dada pela massa, para estruturas discretas, de esqueletos, nas quais os esforços eram absorvidos pela resistência das seções das barras. Por um lado, isto possibilitava estruturas mais leves mas, por outro, exigia uma preocupação maior com o comportamento estrutural.
Para a engenharia de estruturas, o estilo gótico foi um passo fundamental na transformação do conhecimento estrutural empírico em conhecimento científico.
Em 1250, o ensino das artes liberais dividiu-se nitidamente em disciplinas humanistas e disciplinas exatas: o Trivium e o Quadrivium.
No trivium aprendia-se gramática, retórica e dialética e no quadrivium, música, astronomia, aritmética e geometria. Interessante notar que a música era considerada uma disciplina tão exata como a própria aritmética, o que de fato é coerente. Essa divisão propiciou a concentração do esforço de aprendizado em disciplinas afins, evitando dispersão e preparando de forma mais profunda o estudante de cada área. Por outro lado, a formação mais especializada levaria faltalmente a uma separação no campo profissional.

A idade da razão

No final da Idade Média, cidades como Florença e Veneza tinham posição de destaque no cenário europeu, em virtude de suas atividades comerciais. Os príncipes que governavam essas cidades admiravam as obras de arte, cercavam-se de uma corte de artistas e escritores e ordenavam a construção de monumentos.

Os artistas e escritores se inspiravam muito na cultura greco-romana, o que levou à criação do movimento denominado "Humanismo".
Os humanistas, que escreviam normalmente na língua grega ou latina, fundaram bibliotecas, academias e propagaram o "livre-exame", o espírito de observação e a crítica, o que favoreceu o desenvolvimento das ciências durante o Renascimento.
Também influenciou o espírito científico da época a nova forma de expressão do pensamento cristão, desenvolvida no período gótico: passou-se a acreditar " em uma rápida jornada nesta existência miserável" . As pessoas então começaram a preocupar-se mais em descobrir a beleza e a harmonia das coisas deste mundo e a acreditar que a beleza e harmonia eram resultado da existência de regras precisas. Esta atitude não só levou a uma aproximação com as culturas grega e romana como também a uma maneira de pensar mais científica.
Motivado pela nova perspectiva de pensamento, vigente principalmente em Florença, despontou o artista e artesão florentino Filippo Brunelleschi, que estudou profundamente a arquitetura de Roma, interessando-se especialmente pelos processos de construção das cúpulas. Em 1404, quando retornou a Florença, participou dos debates sobre os problemas da construção da igreja de Santa Maria del Fiore. Em 1420, começou a trabalhar na construção da cúpula maior.
Devido à incapacidade dos operários de construir cabotas para a fôrma de uma cúpula com o tamanho de vão desejado, Brunelleschi acabou inventando um novo processo construtivo: a execução da cúpula sem o uso de cimbramento.
Para isto, era necessário que a alvenaria de tijolos da cúpula fosse colocada em círculos, com um traçado previamente estabelecido por relações geométricas precisas e sem possibilidade de correção na obra.
Outra solução inovadora foi o uso de casca dupla com a colocação das nervuras no espaço vazio entre cada casca.
O uso da casca dupla, um marco na história da arquitetura, permitiu projetar o exterior e o interior da cúpula de maneira diferente.
"Com Brunelleschi a arquitetura passou de uma fase de tecnicismo empírico a outra, de especulação matemática; o construtor renascentista era um intelectual, o medieval um artesão". (Paolo Rossi). Com Brunelleschi inauguram-se os métodos mais científicos de construção.
Em 1445, em Mainz, Gutenberg lançou o primeiro livro impresso: a Bíblia.
Essa invenção motivou o aparecimento de escritores interessados em disseminar o conhecimento vigente para o maior número possível de pessoas.
Muitos arquitetos puderam então publicar idéias e experiências sobre projetos próprios e de outros.

Antigos trabalhos vieram a lume, como o do pintor e engenheiro Cesare Cesariano que, em 1521, traduziu do latim para o italiano o antigo tratado de Vitruvius - De Architectura Libri Decem.
Outras traduções do mesmo tratado foram feitas em francês, em 1547, e em alemão, em 1548.
As informações transmitidas por Vitruvius a respeito das técnicas construtivas dos gregos antigos serviram de fonte de estudo para arquitetos e engenheiros brilhantes, como Brunelleschi, Bramante, Michelangelo, Palladio e Leonardo da Vinci, entre outros.
Muitos sábios da antiguidade, tais como Euclides, Arquimedes, Apolonio e outros, foram traduzidos e tiveram as suas idéias divulgadas pela imprensa.
Até aquela época, toda a literatura científica, para ser considerada séria, tinha de ser em latim., o que se tornava uma barreira para quem quisesse usufruir esses conhecimentos, como havia acontecido com o próprio Brunelleschi, totalmente ignorante das línguas latina e grega. Leon Battista Alberti, humanista, escritor, arquiteto e economista italiano defendeu o uso da língua pátria nos tratados científicos, procurando com isso facilitar a divulgação do conhecimento.
No entanto, acabou escrevendo seus livros em latim, submetendo-se às exigências da época. Em 1450, completou a sua obra mais importante, distribuída em dez livros: De re Aedificatoria, na qual expõe de maneira nova uma teoria de arquitetura e de estética.
Era um trabalho diferente dos tratados medievais de arquitetura, que ensinavam a executar as obras sem explicar os fundamentos técnicos envolvidos.
O trabalho de Alberti, que se baseava nos escritos de Vitruvius, com modificações e até mesmo correções, mais que um manual de regras construtivas era um livro baseado em conceitos, asserções e deduções teóricas sobre a arte da edificação.
Alberti incentivava uma ruptura, com a separação das funções de quem projeta das de quem constrói.
Também via o projeto como a prioridade principal da obra, deixando o trabalho de construção para outros.
Com isto, pretendia valorizar a criação intelectual do projeto, relegando a construção a um segundo plano.
Edgar Graeff chamou a atenção para essa ruptura, quando afirmou: "Nessa mudança, de aparência singela, é como se o próprio berço da arquitetura - e conseqüentemente do arquiteto - tivesse se deslocado do canteiro de construção para o ateliê do artista plástico".
Toda a revolução cultural que ocorreu durante o Renascimento foi pouco acompanhada pela produção arquitetônica.

Nessa época, a arquitetura preocupava-se mais em repetir velhas formas e técnicas dos antigos, como gregos, romanos e bizantinos.
Os programas arquitetônicos eram satisfeitos pela adaptação de edifícios antigos: as vilas e os castelos inspiraram palácios e as basílicas e os templos, igrejas.
Por este motivo, não apareceram novos problemas técnicos e construtivos que exigissem a presença do arquiteto mestre-de-obras especializado, que passou a ser substituído por pintores e por escultores, que acabaram assumindo a tarefa de conceber a arquitetura renascentista.
É nesse período que se destacaram figuras como Bramante, Michelangelo e outros.
Leonardo da Vinci, nascido em 1452, foi um verdadeiro representante do espírito científico que então se iniciava.
Na área das estruturas, ele realizou testes de resistência de alguns materiais, analisou as forças que atuavam nos arcos, a resistência das vigas e o comportamento de sistemas de treliças.
Foi provavelmente o primeiro a estudar o comportamento de estruturas usando princípios de estática e a realizar experimentos sobre o comportamento dos materiais. As suas anotações foram escritas de uma forma espelhada, o que as tornou incompreensíveis; o seu trabalho permaneceu desconhecido por muitas décadas.
Quando morreu, em 1519, o projeto das estruturas continuava sendo puramente empírico, não tirando proveito ainda dos seus estudos práticos e teóricos.
Quase um século depois, um membro da aristocracia florentina, Galileu Galilei, nascido em Pisa, em 1564, influenciado pelas descobertas de Leonardo da Vinci, iniciou, forçado inclusive pelas circunstâncias políticas da época, um estudo sistemático do comportamento das estruturas. Em 1590, Galileu escreveu um tratado - De Motu Gravum - em que expunha idéias contrárias às que eram aceitas até então. Isto provocou um conflito, primeiro com aqueles que propagavam os ensinamentos de Aristóteles e depois com a própria Igreja, que o forçou a se retratar perante a inquisição. Em 1633, foi aconselhado por um amigo, membro da inquisição, a renunciar àquelas idéias e a escrever sobre outros assuntos.
Foi assim que Galileu, abandonando seus escritos sobre astronomia, resolveu explorar outras áreas, o que resultou na publicação, em 1638, de um livro que pode ser considerado um marco no estudo científico da engenharia estrutural - Sobre Duas Novas Ciências, publicado pela editora Elzevirs, de Leiden. Esse livro continha estudos sobre a resistência dos materiais.
Foram analisadas também as propriedades dos materiais de construção e a mecânica dos corpos elásticos.

No seu estudo, Galileu chegou à conclusão de que a resistência de uma barra era proporcional à área de sua seção transversal e independente de seu comprimento.

A expressão: "resistência absoluta à ruptura" foi empregada para descrever a resistência última da barra. O trabalho investigava também o comportamento de uma barra em balanço submetida a uma carga concentrada em seu extremo.

Chegou a interessantes resultados, concluindo que a resistência da barra era diretamente proporcional à sua largura, ao quadrado da sua espessura e inversamente proporcional ao balanço. Entretanto, apresentou um conclusão errônea, ao assumir que todas as fibras, exceto as da ponta comprimida, junto ao apoio, eram tracionadas.

Somente quase dois séculos depois é que se chegaria à correta distribuição de tensões em uma viga fletida.

Galileu concluíu ainda que o momento fletor devido ao peso da viga cresce com o quadrado do seu comprimento. Discorreu sobre a relação entre o peso próprio e as tensões desenvolvidas nos elementos estruturais, mostrando que enquanto o peso cresce ao cubo a seção resistente cresce ao quadrado e chegando à conclusão de que, para cada material, existe um limite nas dimensões estruturais, determinadas pelo peso próprio. Chamou a isso de "fraqueza dos gigantes".

Esses estudos serviram de base para o desenvolvimento da análise estrutural mediante modelos reduzidos. Galileu costumava, talvez influenciado por Alberti, escrever seus livros em italiano, o que facilitava a divulgação das suas idéias.

Em 1637, René Descartes, convencido pelos amigos, mas contra sua própria vontade, publica O Método, livro no qual apresenta critérios de execução de experimentos que ajudaram a ciência a se tornar mais sistematizada.

Descartes também introduziu uma ferramenta extremamente útil na visualização do comportamento de fenômenos resultantes de variáveis interdependentes: o sistema de coordenadas cartesianas.

Apesar da grande evolução da teoria científica da época, muitos cientistas, entre eles o próprio Galileu, reconheciam o valor da experiência empírica, defendendo a valorização do trabalho dos artesãos.

Por volta de 1665, Issac Newton, influenciado pelos estudos de Galileu e de Descartes, estabeleceu as três importantes leis do movimento.

O perfeito estabelecimento dessas leis dependia de um tratamento matemático especial, principalmente quando se tratava da determinação numérica da taxa de variação da quantidade de movimento. Para isso, o próprio Newton inventou uma nova ferrramenta, batizada de cálculo diferencial.

Newton ainda enfrentou novo problema, inverso ao anterior, para expressar matematicamente as leis do movimento: o cálculo do efeito total de uma variável que muda de instante para instante.
A solução veio com a criação do cálculo integral.
Foram duas ferramentas importantes para o desenvolvimento de toda a ciência, assim como do próprio cálculo estrutural.
Newton, como muitos outros cientistas, relutou em publicar o seu trabalho, que ficou desconhecido durante muitos anos.
Só se decidiu em 1677, quando outro grande cientista, Leibniz, que de estudante de direito passou a matemático, publicou seu trabalho sobre o cálculo diferencial e integral.
Isso provocou intrigas entre os matemáticos da época, das quais Newton e Leibniz não participaram.
Indignados, os matemáticos ingleses ignoraram por cerca de um século os trabalhos científicos que estavam sendo desenvolvidos no continente e que usavam o cálculo integral e diferencial como instrumento.
A desavença implicou uma grande perda para a ciência em geral, em particular para a engenharia e a arquitetura.
Em 1660, Robert Hooke, físico inglês, descobriu o fundamento da teoria da elasticidade: Ut tensio sic vis (a deformação é proporcional à tensão). Entretanto, Hooke manteve a sua descoberta em segredo, até que, em 1676, resolveu publicá-la sob a forma de um anagrama "ceiiinosssttuv", procurando com isso garantir a prioridade na descoberta. Essas firulas, típicas dos cientistas da época, só serviram para atrasar o desenvolvimento teórico e prático das ciências. Em 1678, publicou De Potentia Restitutiva (Sobre a Mola), em que discutia as propriedades elásticas dos materiais e a importante lei que relaciona as deformações e as tensões em corpos submetidos a esforços, hoje conhecida como Lei de Hooke. Hooke foi autor, além dos trabalhos na área teórica, de invenções de grande utilidade prática, como a famosa junta universal, que tem ampla gama de aplicações.
Conta-se que Newton tinha certa inveja da capacidade inventiva de Hooke para aplicações práticas, já que nunca chegou a produzir algo que tivesse aplicação prática imediata.
Como outros fatos da ciência, a descoberta da lei de Hooke também ocorreu, quase simultaneamente, a outro pesquisador. E. Mariotte chegou às mesmas conclusões de Hooke, a partir dos resultados práticos do seu trabalho no projeto de adutoras para suprimento de água para o Palácio de Versalhes. Além de ter chegado às mesmas conclusões de Hooke, Mariotte corrigiu as conclusões obtidas por Galileu no seu estudo de tensões em vigas fletidas. Mariotte notou que as fibras, na metade inferior da seção do apoio, estavam sob compressão.

Apesar dessa observação importante, ele não conseguiu chegar à forma correta de distribuição das tensões na seção fletida, o que só ocorreria mais tarde.
Na época, a necessidade de dinheiro para a construção da Basílica de São Pedro, em Roma, fez com que o Papa Leão X encarregasse os dominicanos de distribuir indulgências na Alemanha. Tal atitude provocou a reação de alguns dominicanos.
Um deles, Martinho Lutero, promoveu o movimento denominado reforma protestante, que desencadeou guerras e perseguições, levando muitas famílias a procurar exílio na Inglaterra.
Este país beneficiou-se muito com os exilados, principalmente na área cultural. Uma dessas famílias era as dos Bernoulli, provavelmente a maior e mais contínua estirpe de matemáticos de todos os tempos; pelo menos dez descendentes são conhecidos e muito contribuíram para a expansão do conhecimento científico.
Na área de estrutura, destacaram-se Jacob I, que contribuiu para avanços na teoria de flexão das vigas, ao conceituar a viga como composta de filamentos que são tracionados e comprimidos, e Johannes I, que formulou um princípio importante para o estudo da estruturas hiperestáticas, "o princípio dos deslocamentos virtuais".
Durante a Renascença, houve um grande crescimento na comunicação entre os povos, que desencadeou ao mesmo tempo a necessidade de novas vias de comunicação, principalmente de pontes.
O uso dos métodos empíricos na execução de arcos tornou-se impraticável, por razões econômicas e de segurança.
Em vista disto, começaram a aparecer teorias que buscavam descrever o comportamento dos arcos.
Em 1695, Philippe de la Hire, membro da Academia Francesa, publicou um pequeno artigo que significava um importante passo na análise do comportamento dos arcos. No artigo, utilizava como instrumento a analogia geométrica, já sugerida anteriormente por Hooke, das correntes ou cordas carregadas - o funicular. Pela primeira vez foi usada a geometria para estimar as forças nos arcos. Hire, entretanto, enganou-se ao afirmar que um arco semicircular composto de aduelas perfeitamente faceadas e sem atrito entre si era instável, concluindo que o cimento de assentamento das aduelas devia contribuir para a estabilidade.
Apesar da conclusão incorreta, Hire deixou uma importante contribuição aos projetistas de engenharia e de arquitetura, o funicular das forças.
Como já foi comentado, o desenvolvimento da ciência das estruturas, durante o Renascimento, não teve quase nenhum reflexo na construção arquitetônica renascentista.

O ideal vitruviano de resistência, utilidade e beleza foi naturalmente aceito e adotado, durante 16 séculos. Da arquitetura romana à gótica, esse equilíbrio permaneceu presente em todas as obras. Porém, os tratadistas que apareceram após Alberti só se interessavam pelo terceiro termo do equilíbrio vitruviano: a beleza. Eram dessa vertente tratadistas como Vignola e Blondel. Criou-se uma nova e profunda ruptura entre a visão profissional do arquiteto e a do engenheiro.
Começaram a aparecer, na Europa e principalmente na França, escolas que procuravam separar definitivamente os conhecimentos teóricos dos arquitetos daqueles que competiam aos engenheiros.
Entre estas destacaram-se, por um lado, L'Academie des Sciences, fundada em 1671, e L'Academie del Corps de Genie Civil, fundada em 1672 - para a formação de engenheiros e, por outro, a Academie Royale d'Architecture, fundada em 1671 - para a formação de arquitetos.
A partir daí, os arquitetos deixaram de aprender nos canteiros e nas guildas, passando a ter uma formação mais teórica, portanto mais ligada ao desenho do projeto e menos à obra.
Como reflexo da formação dada aos seus profissionais, a arquitetura da época procurou enfatizar o ornamento, resultando no estilo barroco.
A palavra barroco é portuguesa, designando as pérolas defeituosas, com a superfície cheia de reentrâncias.
A palavra foi usada para descrever pejorativamente as arquiteturas de Borromini e de Guarini, consideradas uma aberração em relação às regras da arquitetura clássica.
O estilo barroco criou uma arquitetura multifacetada e monumental.
Hoje, a palavra não tem mais conotação pejorativa, sendo usada para designar obras majestosas e com decoração excessiva. A arquitetura, vista dessa forma, foi sendo praticada à margem de todo o desenvolvimento científico que estava ocorrendo na teoria das estruturas.
Enquanto isso, Leonardo Euler, considerado o mais produtivo matemático da história, influenciado pelo estudo dos Bernoulli, apresentou importantes teorias para o desenvolvimento da engenharia estrutural, principalmente o seu estudo para a estabilidade das peças comprimidas. Euler mostrou que as colunas curtas tendem a se romper a compressão simples, enquanto as mais longas podem romper-se por uma flexão especial, denominada flambagem.
Charles Augustin Coulomb, engenheiro militar, escreveu um artigo intitulado "A aplicação das regras de máximo e de mínimo para problemas da estática relacionados à arquitetura", no qual reconhecia a importância tanto da tração como da compressão em vigas fletidas, encaminhando a solução da distribuição das tensões nas seções transversais das vigas.

No mesmo trabalho, ele mostrou a existência da força cortante.
Pela primeira vez, o equilíbrio de uma viga foi claramente colocado. Coulomb também demonstrou que a teoria dos arcos de Hire não era correta. No entanto, não desenvolveu totalmente as suas idéias sobre o equilíbrio dos arcos, o que fez com que permanecessem inaproveitadas pelos engenheiros, até o século XIX. Afora esses assuntos, Coulomb realizou experimentos sobre a torção.
Além dos cientistas, que desenvolviam teorias e experimentos para o avanço do conhecimento científico, era necessária a existência de pessoas que se propusessem a reunir e a organizar todo o conhecimento espalhado em diversos livros, artigos e conferências, tornando a linguagem dos cientistas mais acessível aos engenheiros.
Um dos mais importantes organizadores foi o engenheiro militar e professor da Escola de Artilharia de La Fère, Bernard Forest Belidor, que não se conformava com a falta de livros-textos nas escola técnicas e publicou, em 1729, La Science des Ingéniers e, em 1737, Architecture Hydraulique. Estas obras foram muito bem recebidas, tanto que a última edição do seu primeiro livro ocorreu 101 anos após o lançamento.
Outro que também deu grande contribuição nesse sentido foi Hubert Gautier, que de médico passou a engenheiro, tornando-se, em 1716, inspetor de pontes e canais. Gautier lançou, em 1715, o livro Traité de la Construction de Chemins en France e, em 1716, publicou Traité des Ponts.
Este último foi considerado o trabalho padrão sobre o assunto por setenta anos, destacando-se por seu caráter bastante prático, bem acessível aos engenheiros em geral. Gautier não perdoava os excessivamente teóricos e criticava-os severamente em seus livros.
Tal postura contribuiu para que os teóricos da ciência estrutural começassem a procurar uma forma mais inteligível de comunicação com os engenheiros.

As revoluções francesa e industrial

Baseada nas idéias iluministas da época, surgiu uma corrente arquitetônica que se opunha ao excesso de ornamentação, próprio da arquitetura barroca. As idéias de racionalidade e de valorização do indivíduo, defendidas por filósofos como Kant, Montesquieu, Voltaire e Rousseau, influenciaram arquitetos como Carlo Lodi e Abbot Laugier, que passaram a exigir dos colegas uma "arquitetura mais honesta" e "verdadeira em si própria". Motivados por essa proposta, começaram a aparecer projetos em que as funções eram claramente explicitadas, sendo tudo mostrado e nada escondido por ornamentos.

Nesta corrente, como era de se esperar, ocorreram alguns exageros, com o surgimento de projetos utópicos, de execução tecnicamente impossível, como a casa projetada por Claude-Nicolas Ledox, que consistia em um cilindro horizontal perpassado por um riacho que mergulhava como cachoeira num segundo rio. Ledox procurava, com o projeto, simbolizar o domínio dos meios técnicos racionais sobre os elementos da natureza.
Com propostas como esta, alguns arquitetos procuravam estabelecer uma nova postura: a possibilidade de construir deixava de ser essencial ao projeto.
Como outra reação ao estilo barroco e alimentado pelas idéias iluministas, surgiu um movimento na arquitetura, denominado classicismo, que procurava retomar os valores intelectuais da Renascença e do Humanismo, tornando popular a idéia de que era na arquitetura dos antigos que se encontravam os ideais de harmonia e de beleza. Esse movimento provocou grandes conseqüências, criando outras lacunas profundas entre a arquitetura e o desenvolvimento técnico e científico que estava ocorrendo.
Por volta da metade do século XVIII, no início da Revolução Industrial, as escolas de arquitetura que cultivavam a arquitetura como arte não conseguiam mais atender as exigências técnicas e científicas da época.
Em vista disso, nova e mais profunda ruptura ocorreu no ensino da engenharia e da arquitetura com a fundação, em Paris, da École de Ponts et Chaussés. Por sua vez, a Academie d'Architecture recrudesceu suas ações em defesa do ensino da sua arte, protegendo-a como podia da ameaça da ciência. Diante de posição tão radical, os chefes da Revolução Francesa mandaram fechar a Academie d'Architecture, assim como as academias de Pintura e de Escultura.
Como conseqüência, começaram a aparecer os tratados exclusivamente técnicos, muito especializados, com uma linguagem totalmente afastada da realidade da composição arquitetônica, situação que persiste até hoje.
O título de arquiteto perdeu todo o seu valor, tanto em relação aos requisitos oficiais como até perante a opinião pública. Para usar o título de arquiteto não era mais necessário cursar uma escola, bastava apenas pagar uma taxa numa repartição burocrática.
O desenvolvimento da engenharia francesa sofreu um grande colapso com a Revolução Francesa, em 1789. Gaspard Monge, grande matemático, cujos pontos de vista políticos não se conflitavam com os do governo, procurando retomar o desenvolvimento teórico da engenharia, recrutou, em 1795, engenheiros e cientistas para fundar uma nova escola, a École Polytechnique.
Foi o primeiro local onde os engenheiros puderam ampliar os conhecimentos científicos básicos necessários à sua profissão. Tinha a função de municiar os estudantes de conhecimentos suficientes para que pudessem realizar estudos mais avançados na École des Ponts et Chaussés.

Monge, além de outras contribuições, inventou a Geometria Descritiva, tão importante para a época, guardada como segredo militar por cerca de um quarto de século.

Apesar da queda de atividade, os estudos científicos das escolas francesas influenciaram a engenharia civil por todo o século XIX.

Em 1765, James Watt inventou a máquina a vapor, que só foi patenteada em 1769. Tinha início a Revolução Industrial, que tanto exigiria da ciência, dos cientistas e dos técnicos.

Na Inglaterra, a emergente expansão industrial exigia profundos conhecimentos técnicos dos engenheiros, principalmente no transporte por estradas de ferro. Pontes com maiores vãos e com capacidades de carga crescentes eram cada vez mais exigidas.

Essa necessidade conduziu à retomada do uso da treliça, um sistema estrutural já bastante antigo, como testemunham os baixos relevos das colunas de Trajano, em Roma, mostrando pontes de treliças de madeira construídas sobre o Danúbio. Também na Renascença, o arquiteto italiano Palladio já havia projetado pontes de madeira com 33 ou mais metros de vão, usando o mesmo sistema estrutural.

Assim, em 1757, o carpinteiro Jean-Ullrich Grubenmann propôs uma ponte de treliça de madeira sobre o Reno, em Schaffhausen, para uma carga de serviço segura de 25 tf. Para provar a efetiva resistência da ponte, Ullrich lançou mão de um modelo reduzido, pois até então não havia um método científico para o dimensionamento de treliças. Pela primeira vez um modelo reduzido foi utilizado em auxílio ao projeto de uma estrutura.

Em 1775, com a construção da ponte sobre o rio Severn, na Inglaterra, projetada pelo industrial Darby, a madeira usada nas estruturas das pontes começou a ser substituída por um novo material estrutural, o ferro fundido. A façanha foi repetida, em 1793, pelo também industrial Burdon, que construiu a ponte de Sunderland.

Curiosamente, essas pontes imitavam o desenho das pontes de pedras; nelas, procurava-se, com o desenho, garantir o comportamento à compressão adequado ao ferro fundido. Com essas obras, inaugurava-se a era do uso das estruturas metálicas nas edificações.

Em 1806, Napoleão Bonaparte procurou restabelecer a antiga Academie d'Architecture, fechada pela revolução de 1789, agora com outro nome - École de Beaux Arts de Paris. Essa escola era em tudo parecida com a antiga: mesmos mestres e mesmas idéias reacionárias às inovações científicas que ocorriam na época.

Temiam que pudesse haver uma vulgarização das artes, principalmente da arquitetura.

Por outro lado, essa posição era, de certa forma, apoiada pelos chefes da nova ordem burguesa.

A arquitetura concebida na École de Beaux Arts passou a ser um instrumento de afirmação de posição social e de poder, já que os engenheiros, detentores apenas de conhecimentos técnicos, eram considerados incompetentes pela classe dominante para responder aos seus interesses arquitetônicos.

Por outro lado, começou a ocorrer uma emergente necessidade de construções industriais e com ela uma nova proposta de composição estrutural apareceu, o esqueleto formado por vigas e pilares.

As primeiras experiências com essa nova tipologia estrutural apareceram na Europa, mais precisamente na França e na Inglaterra.

A mais antiga deve ter sido realizada, provavelmente em 1801, no projeto da Fiação Phillip and Lee, em Stanford, na Inglaterra, de autoria de dois industriais, proprietários de uma fundição em Soho - Boulton e James Watt, este último o inventor da máquina a vapor. As vigas eram compostas de perfil I metálico e venciam um vão de 12,6 m.

É importante salientar que a opção pela forma da seção em I foi totalmente empírica, já que os recursos de cálculo da época não permitiam comprovar a sua grande eficiência para uso em vigas, o que só seria demonstrado alguns anos mais tarde.

A partir dessas experiências, as estruturas de ferro laminado despertaram o interesse dos construtores em geral, que começaram a empregá-las nas edificações em substituição às abóbadas de pedra e às estruturas de madeira.

Em 1807, Thomas Young publicou o material reunido de suas conferências, em que apresentava o conceito de Módulo de Elasticidade.

No entanto, expressava-se de forma complicada e as suas idéias eram difíceis de entender. Por isto, esse conceito tão importante para a teoria das estrutura ficou arquivado por muitos anos.

A linguagem hermética dos cientistas de certa maneira justificava a aversão que as escolas de arquitetura tinham às matérias científicas.

A definição de módulo de elasticidade feita por Young em seu trabalho dá bem a idéia dessa linguagem quase incompreensível: "o módulo de elasticidade de qualquer material é uma coluna da mesma substância capaz de produzir uma pressão em sua base que é o peso causador de certa compressão, como o comprimento da substância é a diminuição do comprimento".

Em 1809, Navier, engenheiro francês, completou e publicou um trabalho sobre pontes e canais que havia sido iniciado pelo seu tutor e tio E. M. Gauthey. Nesta publicação, destacavam-se as notas produzidas por Navier, usadas pelos historiadores para conhecimento da situação da engenharia teórica da época. Em 1826, Navier publicou o seu próprio livro - Leçons sur L'Application de la Méchanique, no qual, entre outras contribuições para a engenharia estrutural, determinava corretamente a forma da distribuição das tensões de flexão nas seções transversais das vigas.

As bases da teoria da flexão, devidas a Navier, são adotadas até os nossos dias. Seguindo os passos de Navier, o seu aluno Barré de Saint-Venant procurou reunir o conhecimento estrutural da época ao fazer a atualização do livro do professor, acrescentando novas matérias e publicando-o, afinal, em 1864.

Em 1853, Saint-Venant já havia apresentado à Academia de Ciências o seu artigo denominado "Sobre Torção", no qual revisava e reordenava toda a teoria da elasticidade, dando novo impulso à sua aplicação em problemas práticos da engenharia e da arquitetura.

O uso de treliças se expandiu por todo o mundo, sempre executadas com madeira. Em 1840, os engenheiros americanos começaram a usar treliças de ferro fundido e laminado. Esta nova proposta estrutural propiciava uma melhoria na estética das pontes, devido à sua maior transparência e leveza visual. Por conta deste benefício estético, o sistema de treliças de ferro começou a conquistar espaço nos edifícios. Em 1851, o jardineiro Joseph Paxton ganhou o concurso para a construção de um pavilhão – o Palácio de Cristal - para a Primeira Feira Mundial, em Londres, utilizando um sistema pré-fabricado composto de treliças metálicas.

Em 1847, em vista da necessidade de melhorar o conhecimento sobre o comportamento das treliças, S. Whipple propôs os fundamentos de um método gráfico e analítico de determinação de forças nas barras das treliças. A sua proposta era baseada no desenho do polígono de forças para cada nó da treliça. Por volta de 1850, diversos métodos de projeto de treliças tornaram-se conhecidos, na Europa e na América.

Em 1857, baseado em estudos de Navier, Clayperon publicou a sua importante contribuição para o cálculo dos esforços nas vigas contínuas: a equação dos três momentos. A aplicação prática do trabalho de Clayperon tornou-se possível graças à solução gráfica proposta por Otto Mohr, que simplificou os cálculos originais. Mohr produziu ainda outros trabalhos na área da estática das construções, como o princípio dos deslocamentos virtuais, que facilitou o cálculo dos esforços nas estruturas hiperestáticas.

Para o cálculo de pontes, introduziu o conceito de linhas de influência; a análise de tensões nos elementos estruturais foi simplificada com a sua proposta gráfica - o círculo de tensões de Mohr.

Outro grande cientista da época, James Clerk Maxwell, que transitou por várias áreas da ciência, como hidrostática, astronomia, eletricidade, entre outras, desenvolveu também vários trabalhos para a engenharia das estruturas. Destacaram-se as contribuições para facilitar a solução de estruturas hiperestáticas e as investigações para verificação das tensões nas estruturas pelo uso de luz polarizada, método denominado de fotoelasticidade, apresentado publicamente em 1850.

A invenção do método da fotoelasticiade teve grande aplicação no estudo de modelos qualitativos e quantitativos das estruturas, permitindo a análise de estruturas muito complexas e sem possibilidade de tratamento analítico. Até então, nos edifícios públicos, havia o predomínio de uma arquitetura embasada nos cânones da arquitetura clássica.

Os avanços na ciência das estruturas, principalmente na área da estática das construções, com a determinação precisa dos esforços em vigas e pórticos, assim como a análise correta das tensões nas suas seções, permitiu que as soluções arquitetônicas dos edifícios públicos, propostas por arquitetos de vanguarda, evoluíssem para o uso de estruturas em forma de esqueleto, constituídas de vigas e de pilares.

O esqueleto formado por vigas e pilares, proposto por Boulton e Watt para a estrutura de uma fábrica, em 1801, serviu de modelo para vários outros edifícios industriais.

Na época, o dimensionamento dos elementos estruturais de ferro era feito de maneira empírica, usando muitas vezes ensaios de peças em escala real. Em 1824, o arquiteto inglês Thomas Tredgold lançou um livro-texto que, durante muitas décadas, serviu de orientação para o dimensionamento de perfis metálicos.

Além de relacionar várias seções com as suas capacidades de carga, o livro apresentava fórmulas empíricas para o dimensionamento de vigas e de pilares, inclusive levando em conta o fenômeno de flambagem. Tredgold era manifestamente contrário à maneira como os teóricos de estruturas divulgavam as suas idéias, que considerava demasiadamente afastadas da realidade prática.

Costumava expressar o seu descontentamento desabafando: "a estabilidade de uma edificação é inversamente proporcional à ciência dos construtores". Em 1855, Joseph Louis Lambot, um construtor de barcos, inventou a argamassa reforçada com ferro, a precursora do concreto armado. Foi o início do desenvolvimento de um novo material para as estruturas das edificações.

Em 1856, Bessemer, inventor quase sem formação científica, descobriu uma maneira econômica de converter o ferro em aço mediante a queima do excesso de carbono. É curioso notar que tal idéia não tenha ocorrido antes aos cientistas que estudavam metalurgia. Embora desde aquela época fosse comercialmente viável, o aço só foi utilizado em estruturas muitos anos mais tarde.

Em 1858, Henri Laboustre projetou o que seria o primeiro edifício público a usar o sistema esqueleto de viga, arco e pilar, ainda de ferro: a Bibliothèque de Sainte-Geneviève, em Paris. Além dessa inovação, Laboustre ousou ao inserir uma linha de colunas de ferro ao longo do centro da sala.

Essa obra antecipava o que seriam as futuras estruturas de concreto armado. Embora a estrutura fosse independente das vedações, Laboustre ainda se mostrava arquitetonicamente comedido quando criou uma fachada de alvenaria com ornamentações tradicionais revestindo a estrutura metálica. Ele foi um dos arquitetos que, como Héctor Horeau, lutaram com denodo contra o academicismo da Beaux Arts; por isso, seus projetos tiveram que esperar muito para serem executados. Laboustre já defendia a idéia de que "a beleza de um edifício decorre menos da sua ornamentação ou do seu estilo do que das suas qualidades lógicas e racionais, tese que seria retomada pouco depois por Vilollet-le-Duc" (Graeff).

Desde 1850, o arquiteto Héctor Horeau, que nunca teve um projeto seu executado, procurava aproximar os arquitetos da grande revolução técnica e científica que estava ocorrendo.

Como a burguesia instalada no poder e as próprias escolas estavam mais interessadas nas reminiscências arquitetônicas, teve o seu nome sempre vetado, o que fez com que até hoje seja pouco conhecido.

Houreau chegou a vencer o concurso para a construção do Palácio de Cristal, mas, por questões políticas, o seu projeto foi rejeitado e substituído pelo do jardineiro Paxton.

O afastamento do progresso científico que as escolas de arquitetura insistiam em manter começava a ser fortemente questionado pelo impacto de novas idéias, como as de Laboustre e Horeau, que enfrentavam o reacionarismo com os seus projetos avançados.

Faltava, entretanto, um embasamento teórico que reforçasse essa posição. Surgiu então o arquiteto Viollet-le-Duc, que pode ser considerado o primeiro grande teórico da arquitetura depois de Vitruvius. Viollet-le-Duc recusou matricular-se na Beaux-Arts, cujo ensino considerava retrógrado, e foi aprender arquitetura com grandes mestres, como Visconti e Fontaine. Alcançou grande prestigio, inclusive internacional, por seus trabalhos de restauração de catedrais góticas, como a Notre Dame de Paris e a de Amiens, entre outras.

O seu trabalho teórico começou com a publicação em fascículos do "Dicionário da Arquitetura Francesa dos Séculos XI ao XVI ". Viollet fundamentou suas teorias em uma prática desenvolvida diretamente nos canteiros de obras. Considerava menos importantes os aspectos formais da arquitetura antiga e mais importantes as lições que aquela poderia fornecer à arquitetura da sua época. Apesar de suas idéias avançadas, foi nomeado professor da Beaux-Arts, onde teve curta permanência. No entanto, as suas lições foram publicadas, em 1863, num livro intitulado "Conferências sobre Arquitetura", que foi traduzido nos E.U.A., exercendo grande influência sobre arquitetos e engenheiros da denominada Escola de Chicago.

Em seus trabalhos, Viollet afirmava que a arquitetura devia refletir o seu tempo; que as soluções construtivas deviam ser mais econômicas; defendia o esqueleto metálico, dizendo que ele viria a ser o equivalente moderno do arco ogival gótico. Para Viollet, o gótico não tinha nada de confuso e misterioso, mas era claro e econômico, tanto em suas soluções como nos materiais usados. Na mesma época, devido ao grande desenvolvimento das estradas de ferro, surgiram outros grandes cientistas das estruturas. Um dos mais proeminentes foi W. J. Rankine, engenheiro ferroviário, que escreveu dois livros: Manual de Mecânica, de 1858, e Manual da Engenharia Civil, de 1861. Nestes trabalhos, Rankine procurou organizar os elos perdidos do conhecimento científico, o que, como já se comentou, é necessário para a história da ciência, principalmente nos momentos de grande velocidade de desenvolvimento. Infelizmente, o seu estilo era intricado, não permitindo alcançar todos que se interessavam pelo assunto. Além disso, Rankine deu sua contribuição em alguns aspectos da teoria das estruturas, principalmente nos relacionados ao comportamento dos arcos. Em 1873, um jovem engenheiro italiano, Alberto Castigliano, apresentou a sua tese de formatura ao Instituto Politécnico de Turim, na qual estabelecia o teorema que imortalizou o seu nome.

Nesse teorema, demonstrou que a energia de deformação de um sistema carregado podia ser mostrada em termos de deslocamentos e rotações. Esse trabalho, depois aperfeiçoado por outros, como Muller-Breslau e E. Betti, contribuiu muito para a solução de estruturas hiperestáticas.

Apesar de ter sido inventado duas décadas antes, foi apenas em 1877 que o americano Thaddeus Hyatt apresentou a primeira teoria racionalizada do que seria no futuro o concreto armado; nela, já previa o uso de estribos e de barras dobradas nas vigas, para combater os efeitos do cisalhamento.

Provavelmente motivada pelas idéias de Laboustre, Horeau e Viollet-leDuc, iniciou-se, nessa época, uma nova aproximação entre arquitetos e engenheiros, que em colaboração projetaram edifícios notáveis. Em 1876, o arquiteto Boileau e o engenheiro Eiffel projetaram a loja Bon Marché. Nela, apareceu a primeira solução de edifício comercial iluminado naturalmente através de grandes lâminas de vidro, solução só possível pela correta associação da estrutura metálica com o vidro.

Outra grande colaboração entre arquitetos e engenheiros ocorreu no projeto da Galeria das Máquinas, de 1889, realizado pelo arquiteto Charles Dutert e pelo engenheiro Victor Contamin.

Essa estrutura apresentava grandes inovações: tratava-se da primeira construção de grande porte a utilizar o aço; a concepção da estrutura de cobertura, em que grandes arcos - de até 115 m de vão - apoiavam-se diretamente no solo sem usar pilares e eram independentes das vedações.

Desta forma, as novas possibilidades oferecidas pelos materiais e pelo cálculo passavam a ser plenamente exploradas pela arquitetura na criação dos espaços.
Naquela aproximação arquiteto-engenheiro, destacou-se Eiffel, o primeiro engenheiro a criar, junto com arquitetos como Laboustre, Horeau e Viollet, uma nova arquitetura tanto no aspecto tecnológico como no artístico.
A torre projetada por Eiffel para a Exposição Universal de Paris, em 1899, foi mal recebida por alguns setores, que a catalogaram como mais uma entre as construções funcionais que nada tinham a ver com arquitetura. Respondendo a esses críticos, que consideravam o seu projeto "a vergonha de Paris" e propunham a demolição da obra logo após a exposição internacional, Eiffel preconizou: "eu acredito firmemente que minha torre terá a sua própria beleza única. Os corretos cálculos de estabilidade não coincidem sempre com a harmonia? ".
Nos E.U.A, o crescente desenvolvimento comercial ocorrido a partir de 1840 exigiu a construção de muitos edifícios comerciais e de grandes armazéns. Nesse quadro, apareceu o relojoeiro e inventor James Bogardus, autodenominado "arquiteto de ferro", que lançou no mercado as estruturas de ferro. Em 1848, ele construiu uma fábrica, em Nova York, em que toda a estrutura era exposta.
O sistema construtivo proposto por Bogardus foi francamente aceito e difundido por todo o país. Em 1853, surgiram os primeiros elevadores seguros, construídos por Elisha Graves Otis, empregados inicialmente para fins industriais. Mais tarde, em 1857, foi instalado o primeiro elevador para passageiros, na loja Chaflan, em Nova York.
Com a criação do elevador e da estrutura de esqueleto, estava aberto o caminho para a verticalização dos edifícios. Entre 1880 e 1890, devido ao crescimento demográfico e à grande valorização dos terrenos, verificou-se, em Chicago, a construção acelerada de grande número de arranha-céus. Eram construções comumente feitas por construtores sem qualquer conhecimento científico de estruturas.
As estruturas metálicas eram dimensionadas empiricamente; por isso, usavam vãos muito pequenos, nunca superiores a 3 m, de tal forma que os esforços mais importantes eram os de compressão simples, nos pilares. Outras cidades americanas, como Nova York, também construíram os seus arranha-céus, mas ficaram mais famosos os de Chicago, um centro comercial importantíssimo, na época. Não se sabe com precisão quem foi o inventor dos arranha-céus.
O empresário e construtor Leroy S. Buffington reivindicava tal título, dizendo ter-se inspirado nas Conferências sobre Arquitetura de Viollet-le-Duc, então recentemente traduzidas e publicadas nos E.U.A.

Um dos mais proeminentes construtores de arranha-céus de Chicago, nessa época, era Guillermo Le Baron, que se formou na Escola Politécnica de Paris. Aprendeu arquitetura na prática, mas não tinha qualquer domínio de detalhes e de ornamentações. Le Baron empregava sempre nos seus edifícios o sistema viga x pilar de ferro, no qual introduzia mesmo algumas peças de aço, já produzidas pelo sistema Bessemer.
Parece ter sido Le Baron o primeiro a utilizar o aço em edificações.
A grande importância de Le Baron, entretanto, reside no fato de que na sua empresa construtora estagiaram aqueles que seriam os maiores arquitetos de Chicago. Com Le Baron eles aprenderam a forma de tratar os novos programas arquitetônicos e a utilizar as alternativas técnicas construtivas propiciadas pelos novos materiais; ensinamento que as escolas oficias não queriam ou não podiam fornecer.
Daí, historicamente ser reconhecido como o fundador do movimento denominado "Escola de Chicago".
Dos arquitetos que passaram pelo seu ateliê destacou-se Louis Sullivan, que o freqüentou por volta de 1873; Sullivan é considerado o mais importante arquiteto americano antes de Frank Lloyd Wright, que foi seu discípulo. Sullivan dedicou-se também a trabalhos teóricos e publicou livros que serviram de referência para a arquitetura moderna; a sua frase "a forma segue a função" ficou famosa e tornou-se um princípio da arquitetura.
O movimento denominado "Escola de Chicago" teve vida relativamente curta e não chegou a influenciar a arquitetura européia.
O ano de 1893, em que ocorreu a Feira Mundial de Chicago, marcou o fim do movimento. Naquele ano, o projeto executado por Sullivan para a Feira foi recusado. A arquitetura então retomaria o curso do ecletismo, tão desejado pela burguesia no poder.

A história continua

O novo material concreto-ferro, depois de um período de estagnação por ter sido considerado comercialmente inviável, retomou fôlego pelas mãos do francês François Hennebique.
Embora a sua aplicação ainda não estivesse completamente fundamentada, o material já vinha sendo usado em edifícios.
Em 1896, François Hennebique já o aplicava em lajes, vigas e pilares. Por volta de 1902, o professor Emil Morsch, da Universidade de Stuttgart, na Alemanha, publicou uma descrição bem fundamentada no aspecto científico do comportamento do concreto-ferro; a partir de ensaios, desenvolveu a primeira teoria efetiva sobre o dimensionamento de peças estruturais com esse material.

O concreto-ferro infundiu confiança e, com as suas características plásticas possibilitando ampla gama de formas, tornou-se mais uma opção para o projeto de estrutura e, claro, de arquitetura.
Arquitetos como Auguste Perret e Erich Mendelsohn procuraram explorar as vantagens do concreto. Em 1905, Auguste Perret e seus irmãos Gustave e Claude fundaram uma empresa especializada na construção de concreto-ferro. Entretanto, não exploraram as possibilidades plásticas do material, apenas substituíram o que seriam vigas e pilares de aço por outras de concreto-ferro.
Coube aos engenheiros, principalmente Robet Maillart, explorar formas inéditas com o novo material. Em 1912, Maillart projetou uma cobertura de laje apoiada diretamente sobre os pilares (laje-cogumelo) para uma fábrica na Suíça.
Nessa obra, os pilares convergiam para a laje com uma forma que lembrava um cogumelo.
Outro engenheiro utilizou e fez evoluir a teoria sobre o comportamento do concreto armado. Foi o francês Eugène Freyssinet, que projetou pontes, coberturas em forma de cúpulas e cascas, explorando a plasticidade do novo material.
Os hangares de aviões do Aeroporto de Orly, em Paris, foram projetados como uma casca plissada, não havendo distinção entre teto e paredes laterais, lembrando de alguma maneira o conceito formal do Pavilhão de Máquinas, de 1889.
Apesar de sua utilização ter-se disseminado rapidamente, o concreto-ferro, por ser então material muito novo, enfrentou grande preconceito das escolas de arquitetura oficiais. Le Corbusier conta que, em 1909, na École de Beaux Arts de Paris, o professor de desenho estrutural adoeceu e seu lugar foi ocupado pelo engenheiro-chefe do Metrô. Quando anunciou que ia discorrer sobre as novas possibilidades estruturais e arquitetônicas que podiam ser oferecidas pelo concreto armado, foi colocado para fora da sala, aos gritos, pelos alunos. Para estes, tal material podia servir bem para galerias, túneis ou até fábricas, mas não para trabalhos artísticos sérios. Essa atitude patenteava o reacionarismo daquela escola, infensa a qualquer novidade técnica.
Em 1908 o arquiteto austríaco Adolf Loos escreveu um artigo em que chamava a atenção para os prejuízos que o excesso de ornamentação poderia causar, tais como dificuldade de execução, remuneração baixa para o artesão, depreciação rápida do produto em virtude da mudança de gosto dos clientes e assim por diante.
Loos chegou a dizer que a ornamentação era um crime. Loos, com suas idéias, foi um precursor do movimento moderno na arquitetura.

Na Alemanha, Peter Behrens, que iniciou carreira como artista plástico, desenvolvendo seus desenhos a partir de elementos geométricos, extrapolou essa linguagem para a arquitetura, criando volumes geometricamente bem definidos, normalmente a partir de quadrados e de circunferências.
Desta forma, Behrens contribuiu para desviar a arquitetura do estilo romântico da "Art-Noveau", que havia surgido em oposição à arquitetura industrial do final do século XIX. Behrens tornou a solução arquitetônica mais racional e menos subjetiva.
Outra contribuição de Behrens à história da arquitetura foi a de terem passado por seu escritório, como aprendizes, grandes arquitetos deste século, como Ludwig Mies van der Rohe, Charles-Édouard Jeanneret ou Le Corbusier e Walter Gropius.
Walter Gropius e Adolf Meyer projetaram, em 1911, a fábrica Fagus. Nela, os resultados formais eram de pura objetividade.
O volume se reduzia a um cubo transparente que parecia ser todo feito de vidro. Essa obra prenunciou o que viria a ser a linguagem formal do racionalismo.
Em 1919, em Weimar, na Alemanha, foi fundada uma nova escola baseada nos conceitos desenvolvidos por Gropius. Recebeu o nome de Bauhaus e teve como seu primeiro diretor o próprio Gropius. O nome dado à escola inspirou-se em Bauhütten, que era a associação de construtores e artesãos da Idade Média. Bauhaus tornou-se o mais influente instituto educacional de arquitetura, design e arte do século XX.
A valorização do sistema estrutural na arquitetura ocorreu por volta de 1920, com as idéias de Le Corbusier. A sua arquitetura de pilotis, plantas livres e regularidade de apoios só se tornou possível pela admissão da estrutura como participante incondicional da forma arquitetônica.
Pode-se dizer que foi a partir dessa proposta que a arquitetura voltou a se aproximar mais estreitamente da engenharia.
Le Corbusier tornou-se o porta-voz do movimento moderno, através de suas publicações, tais como L'Espirit Noveau e Vers Une Architecture.
Também em 1920, o concreto-ferro passou a se denominar concreto armado, nome que perdura até nossos dias.
Em 1924, o engenheiro dinamarquês Ostenfeld publicou um estudo sobre a teoria da elasticidade, mostrando a relação entre o método das forças e o método dos deslocamentos, extremamente útil na solução de estruturas hiperestáticas e de formas complexas.
O seu trabalho foi pouco considerado, na época. Só foi aproveitado depois da Segunda Guerra, com o advento do computador eletrônico.
Em 1927, o prof. G. E. Beggs publicou um artigo sobre um método de análise de deflexões e de inclinações por meio de modelos reduzidos.

Desta forma, estruturas muito complexas, como as cascas, para as quais o tratamento matemático era muito difícil ou mesmo impossível, poderiam ter os seus esforços determinados com o auxílio de equipamentos eletrônicos, como o "multi channel strain gauge".
Em 1930, o Prof. Hardy Cross desenvolveu um processo de determinação de esforços em estruturas hiperestáticas, de fácil utilização, praticado até hoje - "o processo de Cross".
Com essa ferramenta podiam ser facilmente resolvidas as vigas contínuas e os pórticos, simplificando sobremaneira o trabalho manual dos engenheiros calculistas. Nessa época, a engenharia estrutural já possuía instrumentais matemáticos e práticos suficientes, assim como um bom conhecimento do material concreto armado, para experimentar formas estruturais que extrapolassem as convencionais - lajes, vigas e pilares.
Assim, surgiram as cascas na forma de conóides e de parabolóides, entre outras. Enquanto os arquitetos procuravam formas estruturais bem-comportadas, como laje sobre malha regular de vigas que se apoiavam em malha regular de pilares, repetindo com o ferro e o aço formas já bastante exploradas anteriormente com outros materiais, engenheiros como Eduardo Torroja , Robert Maiallart e Pier Luigi Nervi ousaram ao propor formas muito mais livres e complexas. Quando as ferramentas de cálculo eram insuficientes ou duvidosas, lançavam mão de ensaios com modelos reduzidos.
Arquitetos como Mies van der Rhoe levaram os ideais racionalistas às últimas conseqüências, com suas formas elegantes, mas frias. Mies defendia que a forma arquitetônica era revelada pela eliminação de qualquer ornamento. A única decoração admissível seria proveniente do efeito dos materiais utilizados. Foi quem cunhou a famosa máxima: "menos é mais", que resumia todo o seu pensamento. O seu estilo sempre exerceu influência nos meios profissionais, inclusive nos dias atuais.
"Os pioneiros da arquitetura moderna sonhavam com casas que não só funcionassem como máquinas mas também pudessem ser produzidas por elas. Com efeito, as construções modernistas de 1920 e 1930 pareciam ter sido executadas por máquinas; na verdade, eram produto de intricado trabalho manual. E quando de fato foram produzidas industrialmente, em grande número, ficou claramente evidenciado que o resultado era ao mesmo tempo monótono e de qualidade extremamente baixa em acabamento e forma" (Gympel). Após a Segunda Guerra, começaram a aparecer dúvidas sobre se a arquitetura essencialmente racionalista expressava realmente liberdade e democracia. A idéia de que formas livres e mais naturais estavam mais próximas de dar ao homem liberdade e bem-estar começou a se difundir, transformando-se num movimento denominado "Arquitetura Orgânica".

Esse tipo de arquitetura era baseado na teoria das proporções de Plato, que também serviu de influência para a arquitetura da Renascença.
Os desenvolvimentos técnicos obtidos pela engenharia estrutural facilitaram o desenvolvimento dessa arquitetura e possibilitaram a abertura de mais um canal de comunicação entre arquitetos e engenheiros.
Foi nessa época que adveio um novo tipo de literatura sobre estrutura, voltada menos para os aspectos matemáticos e mais para o comportamento dos sistemas estruturais e suas relações com a arquitetura.
Alguns engenheiros de estruturas, preocupados em manter um diálogo mais fácil no campo da sua especialidade, produziram publicações em que trocavam o jargão exclusivamente matemático por outra linguagem mais atraente e acessível aos arquitetos, não tão afeitos ao cálculo.
Um dos primeiros livros desse gênero, até hoje considerado uma das obras de referência no assunto, foi Razon y Ser de los Typos Estructurales, escrito pelo engenheiro Eduardo Torroja, em 1960.
A partir daí, muitos outros livros foram escritos e têm servido para demonstrar: aos arquitetos, que a estrutura está mais próxima da arquitetura do que imaginam; aos engenheiros, que a estrutura não se resume apenas a cálculos numéricos. Durante esse período, a arquitetura expressava formas escultóricas e complexas. A engenharia estrutural teve então de recorrer a ensaios com modelos reduzidos e a novos métodos de cálculo, desenvolvidos para computadores. Um dos métodos que mais tem colaborado para a análise de estruturas complexas, rapidamente popularizado com o advento dos microcomputadores e até hoje praticado, é o método dos elementos finitos. Consiste basicamente em analisar o comportamento global da estrutura, dividindo-a em pequenos elementos retangulares e/ou triangulares e verificando as interações que ocorrem entre tais elementos.
A estrutura nunca esteve tão presente na arquitetura como no movimento, iniciado na década de 60, denominado "Arquitetura High-Tech".
Nele, a estrutura passava a ser a principal definidora das formas arquitetônicas. Detalhes de ligações, instalações e demais elementos técnicos da edificação deveriam ser deixados expostos, sendo os seus desenhos componentes do resultado formal da arquitetura.
O Centro Cultural George Pompidou, em Paris, do arquiteto Renzo Piano, o Banco de Hong Kong, em Hong Kong, de Norman Foster, são edifícios característicos desse movimento, com suas estruturas expostas, compondo as fachadas dos edifícios. Nesse tipo de arquitetura, o compromisso do arquiteto com a solução estrutural é muito grande, exigindo dele conhecimento profundo do comportamento das estruturas. Muitos arquitetos do movimento têm-se dedicado ao estudo mais específico de estruturas, formando-se também em engenharia.

Ainda nos anos 60, surgiu o arquiteto americano Robert Venturi, que propôs uma arquitetura oposta às idéias modernistas.
A assimetria balanceada foi substituída pelo retorno à simetria clássica; as paredes transparentes foram trocadas por fachadas trabalhadas, por pequenas janelas e pela aplicação de ornamentos.
Tratava-se do movimento arquitetônico denominado Pós-modernismo, caracterizado também pela total falta de uniformidade de cores, de forma e de materiais.
Em 1990, após uma feira realizada em Nova York e organizada por Philip Johnson, denominada "Arquitetura Deconstrutivista", foi lançado o movimento que receberia o mesmo nome.
Alguns intérpretes do movimento consideravam-no relacionado ao modernismo e por isso denominavam-no também de "Novo Modernismo".
Os deconstrutivistas, como ocorreu em outros movimentos anteriores, pretenderam assinalar o seu, associando-o à frase criada por Benhard Tschumi: "a forma segue a fantasia". Com esse movimento, a estrutura voltou a ser escondida e tornou-se de difícil leitura. Normalmente, a forma expressada pela arquitetura pouco tem a ver com a solução estrutural.
O deconstrutivismo parece dar pouca importância à solução estrutural, que precisa fazer malabarismos para acompanhar a forma arquitetônica.
Faz também prever uma nova ruptura entre arquitetura e estrutura.
Apesar de os movimentos pós-modernistas e deconstrutivistas estarem em grande evidência, expressões racionalistas baseadas no modernismo clássico continuam a existir nos dias atuais.
Hoje, na área do cálculo estrutural, sofisticados softwares simplificam o trabalho do engenheiro de estruturas, diminuindo o tempo de processamento e levando a soluções muito econômicas.
Se por um lado esses recursos são bem-vindos, por outro o seu uso inadequado e a falta de experiência dos usuários têm levado a estruturas pouco rígidas, acarretando problemas para os elementos de vedação e para outros componentes do edifício.
Alguns especialistas, como o prof. Fernando Sabatini, da Escola Politécnica da USP, criticam algumas soluções de materiais e até estruturais assumidas sem qualquer critério por profissionais brasileiros.
A baixa rigidez dos edifícios, resultante de cálculos computadorizados não criteriosos, é um dos aspectos mais criticados e preocupantes.
Está-se valorizando demais o cálculo via computador e neglicenciando o trabalho intelectual de concepção estrutural.
O programa de cálculo por computador deve servir como uma mera ferramenta para chegar à solução estrutural, jamais podendo ser considerado a solução por si só.

BIBLIOGRAFIA

Angerer, Fred
Construccion Laminar
Gustavo Gilli, Barcelona, s/d.

Arcangeli, Attilio
La Estructura en la Arquitectura Moderna
EUDEBA, Buenos Aires, 1965.

Beger, Horst
Light Structures, Structures of Light
Basel, Boston, 1996.

Benévolo, Leonardo
História da Arquitetura Moderna
Editora Perspectiva, São Paulo, 1976.

Buchanan, Peter
Renzo Piano Building Workshop
Phaidon, London, 1997.

Candela, Felix
Hacia Una Nueva Filosofia de Las Estructuras
Ediciones 3, Buenos Aires, 1962.

Cerver, Francisco Asensio
La Arquitectura de Aeropuertos y Estaciones
Espanha, 1997.

Coleccion Somosur
Eladio Dieste - La Estructura Ceramica
Escala, Bogotá, 1987.

Cowan, Henry J.
Architectural Structures - An Introduction to Structural Mechanics
Elsevier, London, 1968.

Cowan, Henry J.
The Masterbuilders - A History of Structural and Environmental Design from Ancient Egypt to the Nineteenth Century
John Wiley & Sons, New York, 1977.

Davies, Colin
High Tech Architecture
Rizzoli, New York, 1988.

Dent, Roger N.
Arquitectura Neumática
Ed. Blume, Barcelona, 1975.

Dias, Luís Andrade de Mattos
Estruturas de Aço - Conceitos, Técnicas e Linguagem
Zigurate Editora, São Paulo, 1997.

Dias, Luís Andrade de Mattos
Edificações de Aço no Brasil
Zigurate Editora, São Paulo, 1993.

Dreese, E. E.
Modern Welded Structures
The James F'Lincoln, Cleveland, 1971.

Engel, Heinrich
Sistemas de Estructuras
Editorial Blume, Madrid, 1970.

Facultad de Arquitectura Universid de Los Andes
Eladio Dieste, La Estructura Ceramica
Escala, Bogotá, 1987.

Fracarolli, Sérgio
Cascas de Concreto Armado - Teoria da Membrana
USP, São Paulo, 1976.

Gerkan, Meinhard von
Architecture for Transportation
Birkhäuser, Berlim, 1997.

Gille, Bertrand
Lés Ingénieurs de la Renaissance
Hermann, Paris, 1964.

Gössel, Peter e Gabriele Leuthäuser
Arquitetura do Século XX
Taschen, Berlim, 1996.

Graeff, Edgar A.
Arte e Técnica na Formação do Arquiteto.
Studio Nobel, São Paulo, 1995.

Gympel, Jan
The Story of Architecture
Könemann, 1996.

Hart, Henn & Sontag
El Atlas de la Construcción Metálica
Gustavo Gilli, Barcelona, 1989.

Hilson, Barry
Basic Structural Behaviour Via Models
Van Nostrand Reinhold, New York, 1974.

Hossdorf, Heinz
Model Analysis of Structures
Van Nostrand Reinhold, New York, 1974.

Kirby, Richard Shelton e outros
Engineering in History
Mac Graw Hill, New York, 1956.

Leite, Maria Amélia D. F. D'Azevedo
Dissertação de Mestrado: O Ensino de Tecnologia em Arquitetura e Urbanismo. FAUUSP, São Paulo, 1998.

Lopez, Oscar Hidalgo
Bambu, Su Cultivo y Aplicaciones
Estudios Técnicos Colombianos, Cali, 1974.

Lotufo, Vitor Amaral e João Marcos Lopes
Geodésica e Cia.
Projeto, São Paulo, s/d.

Mainstone, Rowland J.
Developments in Structural Form
Penguin Books, New York, 1983.

Mascaró, Juan Luis
O Custo das Decisões Arquitetônicas,
Nobel, São Paulo, 1985.

Moore, Rowan
Structure, Space and Skin
Phaidon, London, 1994.

Oliveira, Edith Gonçalves de
Tese de Doutorado : "Aço Sistema de Componentes"
FAUSP, São Paulo, 1988.

Otto, Frei
IL 13, 16 e 17
University of Sttutgart, Stuttgart, 1979.

Pannell, J. M.
An illustrated History of Civil Engineering
Thames and Hudson, London, 1964.

Paricio, Ignacio
La Construccón de la Arquitectura, vol. 1
ITEC, Barcelona, 1996.

Pearce, Peter
Structure in Nature Is a Strategy for Design
The MIT Press, Cambridge, 1979.

Pippard, A. J. S.
The Experimental Study of Structures
Edward Arnold, London, 1947.

Poirier, René
La Epopeya de las Grandes Construcciones
Editorial Labor, Barcelona, 1965.

Process Architecture, n. 23
Pier Luigi Nervi
Kyodo Printing, Tokio, 1981.

Powell, Kenneth
Structure, Space and Skin
Phaidon, London, 1993.

Quarmby, A.
Materiales Plásticos y Arquitectura Experimental
Gustavo Gilli, Barcelona,1976.

Rebello, Yopanan C. P.
Dissertação de Mestrado : "Contribuição ao Ensino de Estrutura nas Escolas de Arquitetura"
FAUUSP, São Paulo, 1992.

Roig, Joan
Nuevos Puentes
Gustavo Gilli, Barcelona, 1996.

Rudofsky, Bernard
Constructores Prodigiosos
Editorial Concepto, México, 1984.

Salvadori, Mario
The Art of Construction
Chicago Review Press, Chicago, 1990.

Salvadori, Mario e Robert Heller
Estructuras para Arquitectos
Prentice-Hall, New Jersey, 1967.

Salvadori, Mario e Matthys Levy
Structural Design in Architecture
Prentice-Hall, New Jersey, 1967.

Sandaker, Bjorn Normann & Arne Petter Eggen
The structural Basis of Architecture
Whitney Library, New York, 1992.

Sandaker, Bjorn Normann & Arne Petter Eggen
Steel, Structure and Architecture
Whitney Library, New York, 1995.

Sharp, Dennis
Santiago Calatrava
Academy Editions, London, 1996.

Silva, Suely Ferreira
Zanine, Sentir e Fazer
Agir, Rio de Janeiro, 1995.

Steadman, Philip
Arquitectura e Naturaleza
Ed. Blume, Madrid, 1982.

Steinman, David B. e Sara Ruth Watson
Bridges and Their Builders
Dover Publications, Nova York, 1957.

Telles, Pedro C. da Silva
História da Engenharia no Brasil
Livros Técnicos e Científicos, Rio de janeiro, 1984.

Torroja, Eduardo
Razon y Ser de los Tipos Estructurales
Instituto E. Torroja, Madrid, 1960.

Vasconcelos, Augusto Carlos de
Estruturas Arquitetônicas - Apreciação Intuitiva das Formas Estruturais
Studio Nobel, São Paulo, 1991.

Vasconcelos, Augusto Carlos de
Pontes Brasileiras
Pini, São Paulo, 1993.

Villalba, Antonio Castro
Historia de la Construcción Arquitectónica
UPC, Barcelona, 1995.

Wilson, Forrest
Structure: The Essence of Architecture
Van Nostrand Reinhold, New York, 1983.

Wittfoht, Hans
Puentes - Ejemplos Internacionales
Gustavo Gili, Barcelona, 1975.

Zerbst, Rainer
Antoni Gaudí
Taschen, Germany , 1993.